

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS DE LA SUPERESTRUCTURA DE BUQUES A VELA
MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS: JARCIA FIRME
(ARBOLADURA)**

**Titulación:
Ingeniería Industrial**

**Área:
Ingeniería Mecánica**

**Tutor:
Carolina Álvarez Caldas**

**Fecha:
Octubre 2011**

**Autor:
Eduardo Gil Parra**

A mis familiares y amigos que han sufrido las consecuencias de estar junto a mí en estos años de carrera.

A todos ellos, muchas gracias.

Agradecimientos

Muchas son las personas a las que agradecer que haya podido terminar uno de los primeros y más importantes proyectos de mi vida como es el de finalizar la carrera.

En especial he de agradecer el sacrificio de mis padres y mi hermana para soportar la impaciencia y frustración del primer cuatrimestre de carrera que sirvió para encauzar el resto de años con menores sudores y horas de estudio más llevaderas.

A mis compañeros de fatiga, especialmente a Ángel y Enrique, siempre es de agradecer la buena amistad y compañía en las larguísimas tardes de estudio en las bibliotecas y las risas en los descansos (cuando los ha habido).

A Alejandra por la paciencia de encajar con buena cara las semanas consecutivas sin saber en qué día vivimos por la rutina de pasar nuestra existencia sentados ante una mesa con la iluminación de un flexo.

Gracias al buen humor de mi tío Julio para relajarme en los momentos difíciles y a las increíbles lecciones de mi tía Amalia día a día.

Siempre hay algún profesor despistado que hace amena la carrera y fortalece las ganas de proseguir con el estudio, también he de agradecerles su sacrificio en la docencia y el buen trato con el que me han obsequiado.

Para finalizar he de agradecer el tiempo de mi tutora y la paciencia con que me recibía en su despacho cuando surgían dudas o dificultades con el modelo del proyecto, siempre sonriente y amable por muy seguidas que fueran mis consultas.

Sin todos vosotros esto no hubiera sido posible.

Índice

Agradecimientos	3
Índice ilustraciones	7
Índice tablas.....	11
Introducción	13
Objetivos.....	14
1. Iniciación al mundo de la vela	15
1.1. Comienzo de la navegación a vela	15
1.2. Evolución de la jarcia	29
2. Descripción aparejo actual	37
2.1. Jarcia firme.....	37
2.1.1. Jarcia continua.....	38
2.1.2. Jarcia discontinua	38
2.2. Velas	39
2.3. Partes del aparejo	41
2.3.1. Coz o base del palo	41
2.3.2. Fogonadura.....	42
2.3.3. Mástil.....	42
2.3.4. Crucetas.....	44
2.3.5. Burdas.....	46
2.3.6. Babystay	47
3. Desarrollo	49
3.1. Simplificaciones	49
3.1.1. Mástil.....	50
3.1.2. Crucetas.....	51
3.1.3. Botavara	52
3.1.4. Velas	54
3.1.5. Cabos	58
3.1.6. Cables	58
3.1.7. Tangón.....	59
3.2. Propiedades elementos	60
3.3. Carga	60
4. Primera Fase: Obtención resultados base para vientos no portantes....	
.....	62

4.1.	Modelo 1: Simple	62
4.2.	Modelo 2: Refinado del mallado	65
4.3.	Modelo 3: Pretensiones sin viento	67
4.4.	Modelo 4: Pretensión con viento	69
4.5.	Modelo 5: Drizas y cabos interior elementos.....	74
4.6.	Conclusiones.....	78
5.	Segunda fase: modificaciones del modelo	82
5.1.	Modelo 6: Perilla y botavara.....	82
5.2.	Modelo 7: Crucetas rectas	85
5.3.	Modelo 8: Babystay.....	88
5.4.	Modelo 9: Violines.....	93
5.5.	Modelo 10: Burdas	95
5.6.	Modelo 11: Burdas sin babystay	102
5.7.	Conclusiones.....	106
6.	Tercera fase: modelo de palo continuo hasta quilla	108
6.1.	Modelo 12: Palo apoyado en la quilla	108
6.2.	Modelo 13: Palo apoyado en la quilla con burdas.....	111
6.3.	Conclusiones.....	115
7.	Cuarta fase: vientos portantes	117
7.1.	Modelo 14: mástil simple con backstay cazado	117
7.2.	Modelo 15: Mástil simple con perfil recto	121
7.3.	Modelo 16: Mástil apoyado en la quilla con vientos portantes	122
7.4.	Modelo 17: Babystay para palo apoyado en la quilla con portantes	123
7.5.	Modelo 18: Spi fraccionado.....	126
7.6.	Modelo 19: Spi fraccionado apoyado en la quilla	128
7.7.	Modelo 20: Portante con burdas apoyado en cubierta	131
7.8.	Modelo 21: Portante con burdas apoyado en la quilla	131
7.9.	Conclusiones.....	132
8.	Quinta fase: Estudio detallado de partes críticas	134
8.1.	Arraigos obenques altos y backstay.....	134
8.2.	Modelo 22: Estudio zona de la perilla	134
8.3.	Modelo 23: Refuerzo arraigo backstay.....	138

8.4.	Modelo 24: Refuerzo obenques altos.....	138
8.5.	Modelo 25: refuerzo crucetas.....	139
8.6.	Modelo 26: Salidas elementos botavara	141
9.	Conclusiones.....	142
10.	Desarrollos futuros	143
10.1.	Modelo 27: Rotura en caso de vuelco	143
10.2.	Modelo 28: Palo giratorio	144
10.3.	Modelo 29: Reducción perfil.....	144
10.4.	Modelo 30: Fatiga	145
11.	Anexo	146
11.1.	Código cdg.....	146
11.2.	Tensiones jarcia	146
12.	Glosario términos náuticos.....	147
13.	Bibliografía	159

Índice ilustraciones

Figura 1: Primeros barcos egipcios	18
Figura 2: Embarcación cretense y grabados marinos.....	19
Figura 3: Navío de Ramsés III	20
Figura 4: Distribución remeros en un birreme.....	20
Figura 5: Pecio barco fenicio	21
Figura 6: Triere griega	21
Figura 7: Primera base naval.....	23
Figura 8: Pentera	23
Figura 9: Trirreme romana	25
Figura 10: El "corvus" romano	25
Figura 11: Barco vikingo	27
Figura 12: Vela cuadra.....	29
Figura 13: Evolución velamen.....	29
Figura 14: Vela latina.....	30
Figura 15: Coca	30
Figura 16: Carraca	30
Figura 17: La Santa María	31
Figura 18: Galeón	31
Figura 19: Navío de línea.....	32
Figura 20: Fragata HMS Surprise	32
Figura 21: France II	33
Figura 22: Santísima trinidad	33
Figura 23: Goleta Thomas W. Lawson.....	34
Figura 24: Corbeta	34
Figura 25: Bergantín y Goleta.....	35
Figura 26: Comparativa aparejos.....	36
Figura 27: Jarcia firme	37
Figura 28: Jarcia continua.....	38
Figura 29: Jarcia discontinua	38
Figura 30: Partes mayor y génova	39
Figura 31: Aparejo y spi	40
Figura 32: Coz y fagonadura	41
Figura 33: Sección mástil.....	43
Figura 34: Reglajes crucetas	44
Figura 35: Crucetas de violín	45
Figura 36: Burdas	46
Figura 37: Babystay	47
Figura 38: Primer campeón Volvo Ocean Race.....	48
Figura 39: Modelo esquemático de mástil (Sparcraft)	48
Figura 40: Geometría mástil	50
Figura 41: Shell63.....	50
Figura 42: Crucetas	51
Figura 43: Beam4	51

Figura 44: Botavara	52
Figura 45: Plano superestructura.....	53
Figura 46: Shell181	54
Figura 47: Shell281	54
Figura 48: Velero navegando ceñida	55
Figura 49: Mayor y génova	56
Figura 50: Spi	57
Figura 51: Velero con spi	57
Figura 52: Arraigo obenques	58
Figura 53: Link10	59
Figura 54: Pipe16 y tangón.....	59
Figura 55: M1 descargado y mallado.....	62
Figura 56: Coz de un mástil apoyado en cubierta.....	62
Figura 57: M1 distribución de presión	63
Figura 58: M1 tensión mástil.....	64
Figura 59: Remallado.....	65
Figura 60: M2 Cdg y desplazamiento perilla.....	66
Figura 61: Comparativa M1 y M2.....	66
Figura 62: Comparativa evolución pretensiones.....	68
Figura 63: Pretensión con viento	69
Figura 64: M4 Desplazamiento jarcia	70
Figura 65: M4 Desplazamiento y tensión mástil	70
Figura 66: Comparativa pretensiones y pretensiones con viento	73
Figura 67: M1 y M4 desplazamientos	73
Figura 68: Detalle de drizas en la coz y pajarín en la botavara	74
Figura 69: M4 y M5 desplazamientos y coz.....	76
Figura 70: M4 y M5 reacciones y tensiones.....	76
Figura 71: M5 Características con drizas.....	77
Figura 72: M1 y M5	78
Figura 73: Desplazamiento y tensiones perilla	79
Figura 74: Tensiones primera cruceta	79
Figura 75: Desplazamientos botavara	80
Figura 76: Tensiones pajarín y escota (izq.) y contra y unión (dcha.)....	80
Figura 77: M1 y M5 reacciones coz y desplazamientos perilla	81
Figura 78: Mallado perilla.....	82
Figura 79: M6 desplazamientos.....	82
Figura 80: M6 tensiones perilla.....	83
Figura 81: Comparativa M5 y M6.....	84
Figura 82: Desplazamientos crucetas rectas	85
Figura 83: Comparativa M6 y M7.....	87
Figura 84: M8 deformación sin pretensión.....	88
Figura 85: M8 Características con babystay.....	89
Figura 86: M8 deformación con pretensión.....	90
Figura 87: Comparativa M6 y M8.....	92

Figura 88: Violines	93
Figura 89: M9 desplazamiento y tensión perilla	93
Figura 90: M9 sin babystay	94
Figura 91: Burdas altas (izq.) y bajas (dcha.) con babystay y sin violín	95
Figura 92: M10 Desplazamiento mástil con burda alta	96
Figura 93: M10 Desplazamiento mástil con burda alta y baja	96
Figura 94: M10 Desplazamiento perilla	98
Figura 95: M10 Caída mástil	98
Figura 96: M10 Desplazamiento	99
Figura 97: Jarcia con burdas	100
Figura 98: Comparativa modelo 10	101
Figura 99: M11 Burdas sin babystay	102
Figura 100: M11 Desplazamiento mástil	102
Figura 101: M11 Acortamiento burdas	103
Figura 102: Comparativa M10 y M11	105
Figura 103: Comparativa modelos segunda fase	106
Figura 104: Fogonadura	108
Figura 105: Mástil apoyado en la quilla	108
Figura 106: M12 Desplazamiento y tensiones	109
Figura 107: Comparativa M6 y M12	110
Figura 108: Mástil apoyado en quilla con burdas	111
Figura 109: M12 Desplazamiento y tensiones	112
Figura 110: Comparativa esfuerzos M12 y M13	113
Figura 111: Comparativa deslizamientos M12 y M13	114
Figura 112: Comparativa reacciones fogonadura M12 y M13	114
Figura 113: Comparativa tensiones M6, M11, M12 y M13	115
Figura 114: Comparativa desplazamiento M6, M11, M12 y M13	116
Figura 115: Mástil con spi	117
Figura 116: M14 desplazamiento	119
Figura 117: M15 deformación	121
Figura 118: M15 desplazamiento fraccionado	122
Figura 119: M16 desplazamientos	122
Figura 120: M16 desplazamientos con backstay cazado	123
Figura 121: M17 desplazamientos	123
Figura 122: M17 desplazamientos con babystay pretensado	124
Figura 123: Spi fraccionado	126
Figura 124: M18 desplazamiento con 0.005 de backstay	126
Figura 125: Desplazamiento con backstay al 0.006	127
Figura 126: Spi fraccionado apoyado en la quilla	128
Figura 127: Comparativa M20 y M21	130
Figura 128: M20 desplazamiento	131
Figura 129: M21 desplazamiento	131
Figura 130: Comparativa global tensiones	132
Figura 131: Comparativa global desplazamientos	133

Figura 132: Arraigo obenques	134
Figura 133: Valores perilla	134
Figura 134: Salidas drizas real	135
Figura 135: Dimensiones salida génova (izq.) y mayor y spi (dcha.) ...	135
Figura 136: Mallado zonas críticas	135
Figura 137: M22 desplazamiento.....	136
Figura 138: M22 tensiones	136
Figura 139: Refuerzos	138
Figura 140: Unión arraigo obenques	138
Figura 141: Comparativa obenques.....	139
Figura 142: Unión crucetas.....	139
Figura 143: Comparativa esfuerzos crucetas superiores.....	140
Figura 144: Botavara real	141
Figura 145: M26 tensiones	141
Figura 146: Rotura de mástil.....	143
Figura 147: Diversas configuraciones de jarcia	144
Figura 148: Diversos perfiles Sparcraft.....	145

Índice tablas

Tabla 1: Datos de partida.....	61
Tabla 2: M1 Reacciones	63
Tabla 3: M1 Resultados	63
Tabla 4: M1 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	63
Tabla 5: M1 Esfuerzos axiales jarcia	64
Tabla 6: M2 Reacciones	65
Tabla 7: M2 Resultados	65
Tabla 8: M2 Esfuerzos axiales jarcia	66
Tabla 9: M3 Reacciones tensión backstay.....	67
Tabla 10: M3 Reacciones tensión estay	67
Tabla 11: M3 Reacciones tensión obenques	68
Tabla 12: M4 Reacciones	69
Tabla 13: M4 Resultados	70
Tabla 14: M4 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	71
Tabla 15: M4 Esfuerzos axiales jarcia	71
Tabla 16: Características pretensión	72
Tabla 17: M5 Reacciones	75
Tabla 18: M5 Resultados	75
Tabla 19: M5 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	75
Tabla 20: M5 Esfuerzos axiales jarcia	75
Tabla 21: M6 Reacciones	83
Tabla 22: M6 Resultados	83
Tabla 23: M6 Cdg	84
Tabla 24: M6 Esfuerzos axiales jarcia	84
Tabla 25: M7 Reacciones	85
Tabla 26: M7 Resultados	85
Tabla 27: M7 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	86
Tabla 28: M7 Esfuerzos axiales jarcia	86
Tabla 29: M8 Reacciones	90
Tabla 30: M8 Resultados	90
Tabla 31: M8 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	91
Tabla 32: M8 Esfuerzos axiales jarcia	91
Tabla 33: M7 Resultados sin pretensión altas	96
Tabla 34: M10 Resultados sin pretensión altas y bajas	96
Tabla 35: Características con burdas	97
Tabla 36: M10 Resultados pretensión	99
Tabla 37: M10 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	99
Tabla 38: M10 Reacciones	100
Tabla 39: M10 Esfuerzos axiales jarcia	100
Tabla 40: M11 Resultados pretensión	103
Tabla 41: M11 Reacciones	103
Tabla 42: M11 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	104
Tabla 43: M11 Esfuerzos axiales jarcia	104

Tabla 44: M11 Resultados pretensión	108
Tabla 45: M12 Reacciones	109
Tabla 46: M12 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	109
Tabla 47: M12 Esfuerzos axiales jarcia	109
Tabla 48: M13 Resultados	111
Tabla 49: M13 Reacciones	112
Tabla 50: M13 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	112
Tabla 51: M13 Esfuerzos axiales jarcia	113
Tabla 52: M14 características	118
Tabla 53: M14 Resultados	119
Tabla 54: M14 Reacciones	119
Tabla 55: M14 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	120
Tabla 56: M14 Esfuerzos axiales jarcia	120
Tabla 57: M17 características	125
Tabla 58: M18 Resultados	127
Tabla 59: M18 Reacciones	127
Tabla 60: M18 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	127
Tabla 61: M18 Esfuerzos axiales jarcia	128
Tabla 62: M19 Resultados	129
Tabla 63: M19 Reacciones	129
Tabla 64: M19 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla	129
Tabla 65: M19 Esfuerzos axiales jarcia	129
Tabla 66: Características cuarta fase	137
Tabla 67: Esfuerzos arraigos obenques altos	138
Tabla 68: Esfuerzos crucetas superiores	140

Introducción

En las siguientes páginas se tratará de estudiar y comprender mejor la manera en que se encuentra cargado el mástil de los barcos a vela y las solicitaciones a las que está sometido.

El deporte de la vela cuenta cada día con más adeptos y las regatas de alta competición siguen siendo un icono de referencia para todos los aficionados a este tipo de navegación impulsada por la simple fuerza del viento.

Es en las situaciones límites donde la gente desarrolla mejoras en las cosas ya existentes o donde se descubren nuevos materiales o estructuras que se diferencian de lo empleado. Así, se hará un pequeño análisis de las diversas estructuras desarrolladas en los últimos años haciendo hincapié en los puntos críticos de la estructura y, siempre que sea posible, encontrar la mejor solución para subsanar una concentración de esfuerzos o una sección crítica.

Para los que nunca han tenido la oportunidad de navegar en un barco de vela es una experiencia muy grata y recomendable para aquellas personas que les guste la emoción y la aventura. Es una nueva sensación la de desplazarse sobre el mar, oyendo simplemente el viento en las velas y el agua deslizarse bajo nuestros pies; en las múltiples ocasiones en que he podido salir a navegar siempre me ha resultado curiosa la idea de sacar empuje del viento con una simple tela soportada por un mástil de aluminio sujeto únicamente por unos cables de acero. Pero ha sido en las regatas en las que participo donde se llevan los materiales al límite y se cuestiona la integridad de la estructura al ir pasados de vela con un viento fuerte que hace escorar el barco y a la tripulación dar lo mejor de sí mismos para obtener el máximo provecho de la situación reinante. La idea de los fenómenos naturales cargando una estructura a simple vista tan endeble y solicitada ha inspirado este proyecto, para rebatir las dudas sobre la estabilidad de un simple perfil de aluminio al que llamaremos mástil sujeto al casco mediante unos cables de acero, estratégicamente colocados, denominados, en el argot marino, como obenques, estay y back-estay.

La estructuración a seguir será evolutiva, es decir, partiendo de un modelo básico y simple iremos introduciendo mejoras hasta llegar a un modelo que sea lo suficientemente optimizado como para darlo como bueno o como modelo final.

Objetivos

Partiendo de un aparejo básico que, detallado más adelante, se llevará a cabo un análisis de carga de la estructura para diversas situaciones.

Se realizará una evolución en la forma y colocación de los diversos elementos sin entrar en variaciones de material puesto que lo perseguido es una mejora estructural y no un análisis comparativo entre los diversos materiales; empleando aluminio para el mástil y las crucetas puesto que es el más extendido en el mundo de las embarcaciones de recreo, dejando de lado los compuestos de carbono empleados en regatas. Puesto que con éste último se mejoran los pesos y las posibilidades de cargar el modelo, pero las mejoras por variaciones estructurales pudiendo considerarlas comunes a las del aluminio.

Será muy importante conocer el centro de gravedad de la superestructura, ya que es de vital importancia en estos barcos los pares de adrizamiento y de vuelco, dependiendo en gran medida del lastre inferior (quilla y orza) y de la colocación del cdg superior en la arboladura, la cual nos puede llevar a un barco estable o a uno que tenga dificultades para mantener su verticalidad.

Debido a la importancia del cdg, lo que se persigue es la mayor resistencia del conjunto con una concentración de peso lo más baja posible, así, combinando los elementos con los que se dispone para conseguir una optimización entre resistencia estructural y peso.

El modelo de partida es una arboladura existente, datos tomados de una embarcación conocida por el proyectista y certificada y medida por el RN (rating nacional), de manera que se tiene un dimensionado inicial fiable del que poder obtener resultados sabiendo que es capaz de soportarlos.

Se persigue comprobar con que grado de seguridad es capaz la estructura de seguir las solicitaciones, como se comporta y cuáles son los puntos críticos en los que se pueda llegar a colapsar y provocar la rotura. Para ello se modelará con el programa Ansys la geometría y se calculará mediante elementos finitos diferentes modelos para encontrar el óptimo y que mejores cualidades reúna.

1. Iniciación al mundo de la vela

La vela, desde el punto de vista de definición es una tela utilizada para proveer propulsión a las embarcaciones aprovechando la fuerza del viento. Es parte del aparejo, el cual se entiende como conjunto de palos, vergas, jarcias y velas. En su función reciben la acometida de la fuerza del viento, la cual transmiten en un impulso provocando la fuerza propulsiva en la embarcación.

Sencilla en sus formas, complicada en la concepción de sus funciones, pasó de ser una herramienta necesaria en la aventura de conquistar el mar, a ser la viva imagen de la libertad, de sueños, de grandeza y hasta de conquista, se ha visto ligada a la ascensión de miles de figuras famosas que modificaron la historia y a aquellos que acompañó en su derrota.

Utilizada por la mayoría de las naciones del planeta, fue llevada a lo largo de la historia a una evolución vertiginosa adoptando cambios diversos, considerados como auténticos avances tecnológicos.

Se avanzará un poco en el extenso mundo de la vela para comprender su evolución e importancia a lo largo de los años.

1.1.Comienzo de la navegación a vela

Sin ningún lugar a dudas, el escollo más importante que le quedaba al hombre para poder establecerse en cualquier lugar que deseara, era el de la conquista de los mares. El mar ha sido el vínculo que ha permitido conocer otras culturas, comerciar con ellas, expandirlas... El dominio del mar era el dominio del Mundo. Y eso lo comprendió rápidamente el codicioso ser humano.

No se conoce el inicio de la navegación a vela con exactitud pero podría estimarse en el 4000aC en Mesopotamia. Se puede presentar una cronología (Barros, Sergio. *Historia de la navegación.*) de hazañas marinas como la siguiente:

ANTES DE CRISTO

4000	Nace la navegación a vela, posiblemente en Mesopotamia.
2000	El Faraón Senusret ordena construir un canal del Nilo al Mar Rojo.
1184	Fecha señalada como la caída de Troya. Viajes de Ulises.
480	Batalla de Salamina.
146	Destrucción de Cartago y Corinto. Roma se adueña del Mediterráneo.
31	Batalla de Accio: Octavio derrota a Marco Antonio y Cleopatra.

DESPUÉS DE CRISTO

- 150 Tolomeo publica su geografía, cuya influencia se prolongó por toda la Edad Media.
- 844 Los vikingos exploran la costa occidental de España.
- 1000 Leif Ericson llega a la costa de América del Norte.
- 1340 Eduardo III destruye la flota Francesa al comenzar la guerra de los Cien Años.
- 1418 Enrique el Navegante funda la Escuela Naval de Sagres.
- 1460 Los portugueses exploran África y llegan a Sierra Leona.
- 1492 Cristóbal Colón en su primer viaje descubre América.
- 1497 Vasco de Gama bordea África y llega hasta las Indias.
- 1448 Juan Cabot explora el Labrador, Escocia y Terranova.
- 1500 Pedro Alvares Cabral reivindica Brasil para Portugal y abre una ruta a las Indias.
- 1519-22 Magallanes da la vuelta al mundo.
- 1524 Giovanni de Verrazano explora para los franceses la costa norteamericana.
- 1571 Batalla de Lepanto.
- 1572-80 Sir Francis Drake da la vuelta al mundo.
- 1588 Derrota de la Armada Invencible en el Canal de la Mancha.
- 1695 Dennis Papin inventa su "olla", precursora de la navegación a vapor.
- 1768-79 El capitán James Cook realiza 3 viajes de exploración en el Pacífico.
- 1772 James Watt inventa el moderno motor a vapor.
- 1797 Robert Fulton presenta su proyecto del submarino "Nautilus".
- 1798 Batalla de Abukir.
- 1804 Fulton y Livingstone construyen un barco de vapor.
- 1805 Batalla de Trafalgar.
- 1807 El "Clermont" de Fulton realiza su primer viaje sobre el río Hudson.
- 1808 El "Phoenix" efectúa el primer viaje a vapor en el mar.
- 1819 El "Savannah" cruza el Atlántico de EEUU a Inglaterra.
- 1827 Batalla de Navarino.
- 1840 El "Britannia" inaugura los viajes regulares entre Europa y EE. UU.
- 1869 Apertura del Canal de Suez, obra de Ferdinand de Lesseps.
- 1905 Batalla de Tsushima, que decide la Guerra Ruso-Japonesa.
- 1912 El "Titanic" choca con un iceberg y se hunde.
- 1914 Apertura del Canal de Panamá.
- 1916 Batalla de Jutlandia.
- 1941 Ataque japonés a Pearl Harbour.
- 1942 Auto hundimiento de la armada francesa en Tolón.
- 1954 Es botado el submarino atómico "Nautilus", de los EE. UU.
- 1958 Los submarinos "Nautilus" y "Skate", de EE. UU., pasan del Atlántico al Pacífico, bajo el casquete polar.
- 1960 Botadura del portaaviones atómico "Enterprise", de EE. UU., el mayor navío de guerra del mundo.

El comienzo de la navegación se supone en un simple tronco flotando en el río, sobre el cual se descubrió que se podía soportar un cuerpo. Ideando la unión de varios de ellos se creó una balsa. A partir de aquí todo sería cuestión de lógica.

El nacimiento de la navegación a vela está profundamente enraizado en una leyenda común a todos los pueblos del mundo civilizado, el Diluvio Universal. Según una milenaria inscripción caldea, los dioses desencadenan la furia de los vientos y las aguas; pero el dios Ea desea salvar la vida de Shamashnapishtim, hijo de Ubaratubon y de su estirpe; para ello le aconseja fabricar un arca de gran tamaño, larga y ancha, sin remo ni timón. En la versión bíblica, Jehová es quien instruye a Noé para una empresa análoga, el Arca bíblica mide 157 metros de largo y 26 de ancho, construida de madera calafateada con betún y con tres puentes y ventanillas. No cabe duda de que varios milenios antes de Cristo se conocían ya los principios básicos de la construcción de naves.

La embarcación más antigua hallada es un barco de pesca descubierto en Corea del Sur, de 8.000 años de antigüedad. Esto no quita el hecho de que los pueblos de la cuenca del mediterráneo fuesen los primeros en volcarse al mar como si de una autopista se tratase.

En el período neolítico el ingenio humano descubre las materias bituminosas y barniza con ellas los cascos de madera para hacerlos impermeables. Una vez los primeros navegantes se aventuraron fuera del resguardo natural de los ríos, se suscitó un nuevo problema: impulsar la embarcación en aguas marinas. En el tercer milenio antes de Cristo, puede que antes incluso, surge la idea de utilizar la fuerza del viento para contrarrestar la fuerza del oleaje, y aparecen las primeras velas. En Egipto se conocen desde el año 3500 aC, pero los eruditos estiman que el invento es mucho más antiguo aún. Se sabe que en tiempos remotos, pueblos enteros se extendieron de archipiélago a archipiélago y aún de continente a continente.

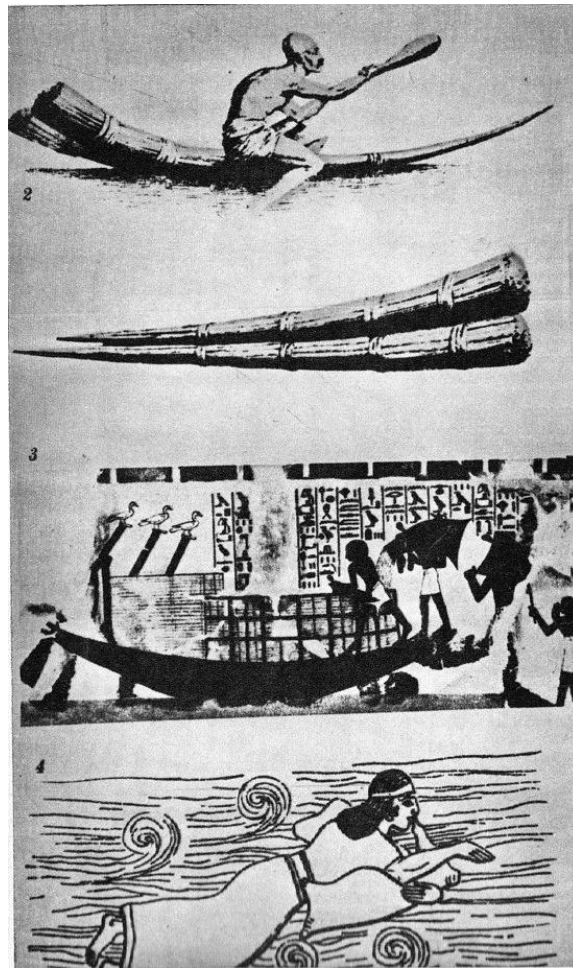


Figura 1: Primeros barcos egipcios

En el antiguo Egipto no tenían árboles para construir sus embarcaciones, de manera que se empleaban papiros o juncos atados en toda su extensión. El objeto primigenio de la vela es desconocido, pero suele situarse en esta civilización al observarse en urnas de arcilla encontradas representaciones de embarcaciones a vela navegando por la superficie del río Nilo; sólo podían navegar a favor del viento con la ventaja de que en el valle del Nilo sopla casi siempre norte, permitiéndoles navegar contra la corriente a vela y bajar el río sin la necesidad de la vela.

En el cuarto milenio antes de Cristo, aparecen en el Egeo las primeras naves de madera sólida impulsadas por velas. Mientras los malayos fabrican velas de hoja de palmera y bambú, los fenicios utilizan tela de lino.

Entre el II y el III milenio antes de Cristo, la marina egipcia explora el Mar Rojo: mil años antes de la guerra de Troya, la flota del faraón Sahuri navega a lo largo de las costas africanas, y más tarde, la reina Hatshepsut, envía sus barcos hacia el sur, donde descubren el País del Incienso (Somalia). Ha nacido

la sed de exploraciones, precursora de la gran epopeya marina que descubrirá al otro lado del globo, un gigantesco continente insospechado, América.

Seguramente sean los Cretenses (1500aC) el pueblo navegante más enigmático (Díaz y Díaz, José y Muñoz León, Luis G. *Enciclopedia Buques de Guerra*). A diferencia de los demás barcos construidos por griegos, romanos o cartaginenses, no se han hallado restos suficientes de bajeles cretenses que nos permitan una detallada reconstrucción. Sólo a partir de pinturas y esculturas minoicas pueden deducirse algunos detalles de las embarcaciones de la primera potencia naval de la que se tiene noticia. Para mantener su hegemonía se necesitaban barcos de guerra para dominar las rutas comerciales con Asiria, Egipto o Grecia. Los primeros barcos, según se desprende de esculturas y pinturas tenían una roda alta y a popa un remo a modo de timón. Carecían de vela y cubierta y se impulsaban por unos treinta remeros

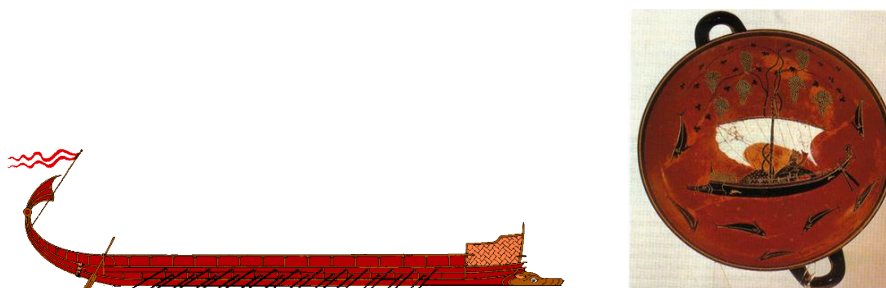


Figura 2: Embarcación cretense y grabados marinos

Posteriormente, con el aumento del tráfico marítimo y los ataques piratas, los cretenses impulsaron la construcción de barcos más grandes dotados ya de velas y de unos 50 remeros. El mástil que sujetaba la vela estaba compuesto por dos palos apoyados en las bordas que se unían en el extremo superior, de la misma forma que los barcos egipcios, con dos diferencias básicas: el aparejo y una roda más levantada en los cretenses.

El final de la potencia naval cretense llegó con el incremento del poder naval de fenicios (800aC), griegos (500aC) y egipcios (1200aC).

1.1.1. La técnica constructiva de los barcos **egipcios** (1200aC) estaba limitada por el tipo de árboles que crecían en las riberas del Nilo. Carecían de quilla y armazón, ya que estaban contruidos por pequeños bloques de "acacia nilótica" unidos entre sí como si fueran ladrillos. El ariete de proa estaba reforzado con bronce y un poderoso remo en la popa hacía las veces de timón.

Un mástil único presentaba en su extremo superior la primera cofa de combate. Las velas, amplias y bien diseñadas, podían ser cargadas sin

necesidad de tenerlas que arriar. Una borda alta y robusta protegía a los remeros.

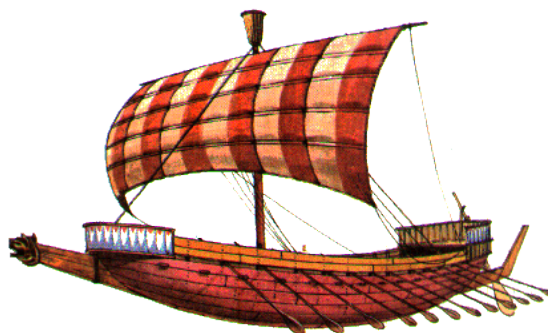


Figura 3: Navío de Ramsés III

1.1.2. Los fenicios (800aC), originarios del actual Líbano, disponían de diferentes tipos de embarcaciones. Por un lado, existía la llamada *gauloi* (*bañeras*) por los griegos, que era una embarcación de carga y recibía este apodo debido a su forma ancha y redondeada. Solía tener entre 20 y 30 metros de eslora y de 6 a 7 de manga. El calado era de unos 1,5 metros y el casco estaba impermeabilizado con pez. Para proteger a la embarcación de posibles maleficios, llevaban en la proa una figura con la forma de algún animal; la popa solía ser de perfil redondeado y terminaba en forma de cola de pescado.

Por otro lado, se encontraba la galera de guerra fenicia. Era un birreme (impulsado por dos órdenes de remeros), con un mástil en el centro de su eslora. La característica más notable de estos navíos es que eran rápidos, manejables y de escaso calado. Su estrecha pasarela de combate y su poderoso espolón en forma de cuerno, fueron una innovación muy utilizada posteriormente. La pasarela de combate albergaba a las tropas de infantería que, durante la batalla, tenían como misión la defensa del barco y el abordaje del contrario. Se sabe que los fenicios llegaron por el norte hasta Britania e incluso se están cuestionando una serie de hallazgos en Brasil que podrían ser testimonio de su presencia en dichas latitudes. Aunque esta posibilidad queda rebatida por el hecho de que preferían navegar al abrigo de las costas.

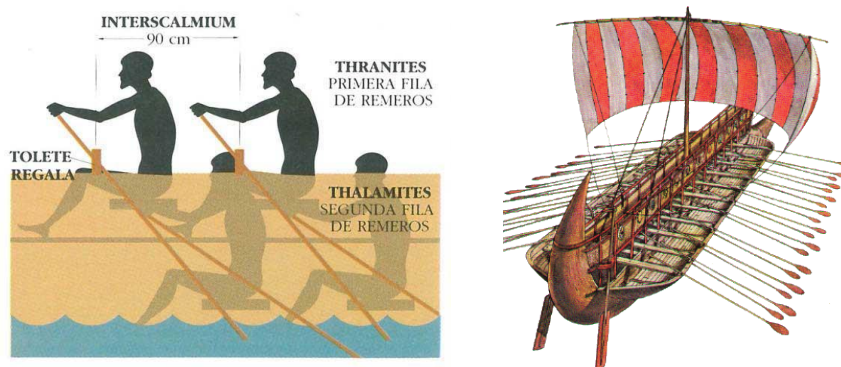


Figura 4: Distribución remeros en un birreme

Descubrimiento barco fenicio en mazarrón¹

En 1989 se encontró, en la Playa de la Isla, los restos de un barco fenicio, que se bautizó como Mazarrón 1; más sorprendente es que en el 1994 se localizara otro barco fenicio íntegro en su posición original y con todo su cargamento intacto, que se denominó Mazarrón 2, ambos pecios se encontraban a 50m de la orilla y a unos 2,5 metros de profundidad, conservados por una capa de posidonea oceánica muerta, que había sellado herméticamente el barco durante tantos siglos (desde el siglo VII aC)



Figura 5: Pecio barco fenicio

Inicialmente los barcos **griegos** (500aC) eran ligeros, con un orden de remos impulsado por cincuenta remeros, y se llamaban *Pentecóntoras*. Más adelante, en el siglo V a.C., el buque principal era la *Triere*, antecesor del Trirreme, que tenía cincuenta metros de eslora por 7 de manga y estaba impulsado por tres órdenes de remos. La quilla y las cuadernas eran de madera de fresno y el casco de abeto.

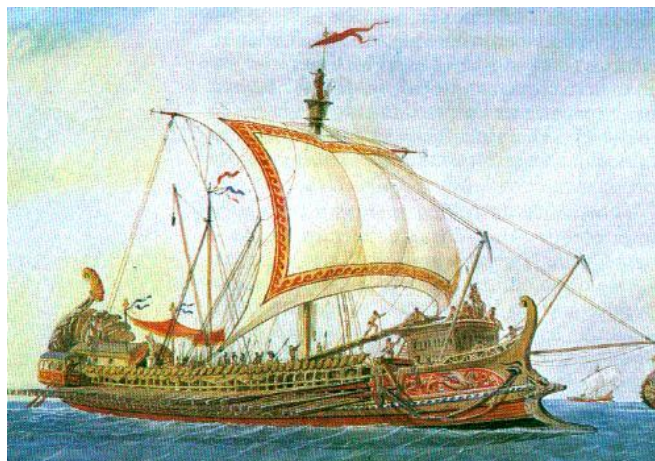


Figura 6: Triere griega

Por lo general la *Triere* sólo tenía un mástil con una verga y una vela cuadrada y empleaba, a modo de timón, dos grandes remos sujetos a ambos lados de la popa. Su dotación era de 170 remeros a los que se unían 10 marineros de maniobra para la vela, 10 soldados de infantería (*hoplitas*) y 10 oficiales, completando así los 200 tripulantes. La longitud de los remos oscilaba entre los 3 metros de los más altos y los 1,60 de los más bajos. En la época

¹ <http://www.menudaeslahistoria.com/el-barco-fenicio-mazarron-2/>

dorada de la Atenas de Pericles, la ciudad tenía una fuerza regular de más de 400 trieres.

Durante muchos siglos los barcos de guerra serían impulsados por remeros, mientras que los navíos comerciales, más sólidos, dependían de los vientos. Fueron las flotas de trirremes las que combatieron en Salamina en el 480aC, después de que Jerjes, rey de los persas, invadiera Grecia y se apoderara de Atenas.

Ante el gigantesco imperio persa, la pequeña Grecia no parecía tener la menor posibilidad de vencer; pero el estratega Temístocles, inspirado por un oráculo que le aconsejara defenderse con "muro de madera", atrajo la enorme flota de Jerjes al estrecho de Salamina y la destruyó completamente.

La victoria permitió a Atenas convertirse, por espacio de más de un siglo, en dueña de los mares. En el puerto del Pireo anclaban no menos de 400 naves, y docenas entraban y salían cada día. Atenas se había convertido en el centro comercial más importante de la época. Pero su gloria sería breve: las guerras del Peloponeso, que duraron casi tres décadas, desarticulaban su magnífica marina, y cuando en el año 415 la flota ateniense intentó apoderarse de Siracusa, perdió 200 barcos y 50.000 hombres. Menos de cien años después Grecia caía ante los macedonios y su luz se apagaba para siempre.

Los sucesores de Alejandro Magno perfeccionaron tanto los navíos de guerra, como las embarcaciones comerciales, pero la tendencia principal consistió en aumentar su tamaño. A fines del siglo III a. de C., la flota de Tolomeo VI contaba con una galera, impulsada por 4.000 remeros: un monstruo de los mares, de más de 135 metros de largo.

1.1.3. Cartago fue fundada aproximadamente en el año 814 a.C. por la mítica reina Dido. En realidad se trataba de una colonia fundada por la ciudad fenicia de Tiro. Los fenicios, en recia competencia comercial y colonial con las ciudades griegas, expandieron sus rutas comerciales hacia el Mediterráneo occidental, tanto en las costas africanas, como en Sicilia, Córcega, Cerdeña y el levante español. La caída de las ciudades fenicias en manos de los asirios permitió, a la incipiente ciudad de Cartago asumir el papel de potencia marítima y comercial en el occidente mediterráneo. En sus viajes de descubrimiento y comercio establecieron rutas comerciales por las costas de Portugal, hacia Inglaterra e Irlanda, ricas en estaño, y por las costas africanas hasta el Golfo de Guinea, ricas en marfil y maderas preciosas.

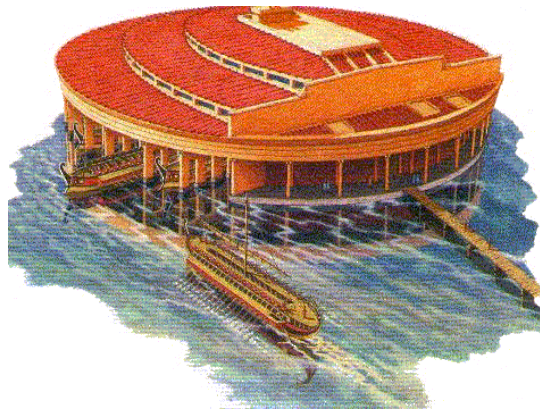


Figura 7: Primera base naval

Para proteger el comercio de sus naves y atacar a las griegas, Cartago dispuso de la construcción de las primeras bases navales para albergar, en sitio seguro, su importantísima flota de guerra, compuesta por veloces monorremes (con un sólo orden de remos movidos cada uno por dos remeros) empleados en misiones de avanzada y ataque a mercantes, y las míticas penteras. La venganza de Roma, tras la última Guerra Púnica, borró todo rastro de la configuración de las bases y de la pentera y su estructura.

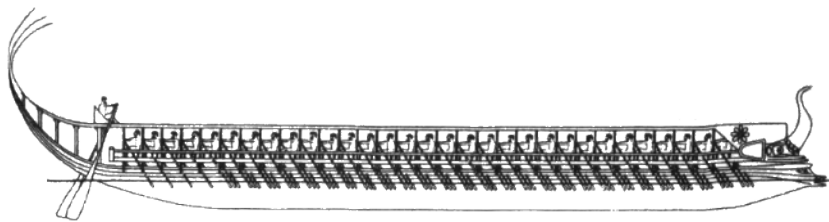


Figura 8: Pentera

En el siglo XIX se discutió por los historiadores cómo serían tales barcos. Unos se inclinaban por calificarlos como barcos con 5 órdenes de remos, algo difícilmente creíble porque 5 órdenes superpuestos daría lugar a barcos muy altos e inestables; otros se inclinaban por veloces barcos de un orden de remos movidos por cinco remeros, algo también difícil de creer por la longitud de los mismos. Los descubrimientos recientes de restos de barcos fenicios en las costas sicilianas y francesas permiten afirmar que las penteras eran barcos con dos órdenes de remos. Los inferiores movidos por dos remeros y los superiores por tres.

La tripulación era de unos trescientos hombres, incluidos los soldados. También tenía una vela cuadrada en un mástil central que ayudaba en la navegación. La técnica constructiva era, en la antigüedad, similar en todos los países y distinta de la de la Edad Media. Mientras que en los veleros de la Edad Media y posteriores se construía primero la quilla, luego las cuadernas del armazón y se terminaba forrando el casco con el tablazón. En la antigüedad la técnica variaba. Primero se construía la quilla, luego el tablazón y por último,

e invirtiendo el proceso, las cuadernas. Además los cartagineses introdujeron una técnica constructiva especial: los elementos prefabricados que le permitían construir gran número de barcos en poco tiempo, ensamblando las piezas numeradas para facilitar la labor a los carpinteros.

La técnica de combate era el ataque al espolón para luego remar hacia atrás y dejar que el agua entrara en el barco enemigo. Mediante esta técnica lograron importantes victorias navales contra griegos y romanos. Sin embargo, los romanos, que eran una potencia terrestre y no naval, desarrollaron una estrategia de enfrentamiento con las veloces penteras que era dotar a sus trirremes de un artilugio llamado "corvus", una plancha de madera, con garfios en los extremos que se clavaban en la cubierta enemiga, trabando los barcos, y permitiendo que la infantería romana pudiera abordar el barco enemigo. Esta táctica convertía las batallas navales en una prolongación de las batallas terrestres en las que no importaba la calidad de los barcos sino de las tropas.

Las guerras púnicas acabaron con este nuevo invento.

1.1.4. La Roma republicana (200aC) era una potencia eminentemente terrestre, pero la confrontación con Cartago, en la Primera Guerra Púnica (264 a.C.), la obligó a desafiar a la potencia naval del momento. A partir de los restos de un buque cartaginés que varó cerca de Roma, copiaron su diseño y, en menos de 2 años, habían construido más de doscientos trirremes. Aunque en la primera confrontación naval entre ambas potencias Roma perdió su flota, en tres años la reconstruyó, adaptándola a nuevas técnicas de combate más próximas a las terrestres.

El trirreme medía unos 50 metros de eslora y portaba una vela cuadrada. Sus tres órdenes de remos le impulsaban a gran velocidad contra el barco enemigo al ritmo que el "Cómitre" marcaba y, una vez que el espolón se clavaba en el costado del adversario, dejaban caer el "corvus" que se ha visto antes. Así unidos, las tropas de asalto pasaban al buque adversario trabándose una lucha que terminaba con la captura de uno de los barcos.

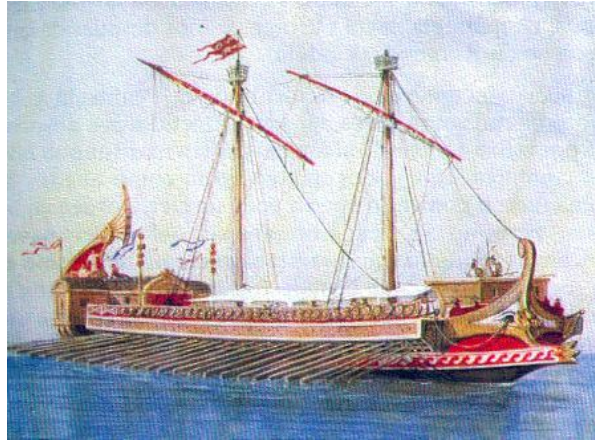


Figura 9: Trirreme romana

Más tarde, en la época de Julio César, se dotó a los trirremes romanos de armas ofensivas, como catapultas y ballestas que lanzaban bolas incendiarias. El trirreme fue el rey del Mediterráneo hasta el final del Imperio Romano.

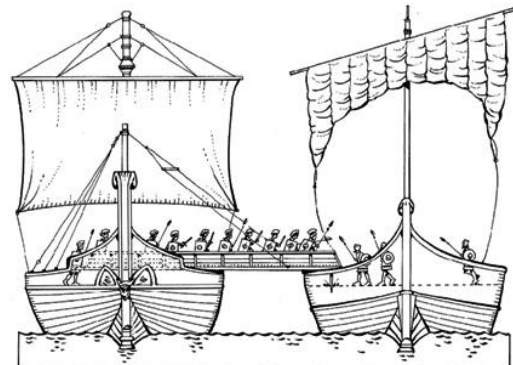


Figura 10: El "corvus" romano

1.1.5. La navegación en China y Oriente

Tres siglos antes del nacimiento de Cristo, pueblos polinesios de cuya historia se sabe muy poco fueron arrojados de Asia y se desplazaron hacia el Este a través del Pacífico, de archipiélago en archipiélago, dejando núcleos de población en cada isla. La increíble peregrinación duró mil años, y en algunos trechos, como entre las Marquesas y Hawái, las grandes flotas de cientos de piraguas recorrían más de tres mil kilómetros sin tocar tierra.

Los antropólogos y arqueólogos han llegado a la conclusión de que los nómades marítimos de la Polinesia utilizaban gigantescas piraguas dobles, provistas de velas e impulsadas hasta por 50 remeros. En el centro se alzaba una plataforma donde se refugiaban mujeres, niños y animales domésticos. El itinerario de estas migraciones oceánicas constituye uno de los grandes misterios de la historia.

En China, desde tiempos muy remotos, existían juncos capaces de navegar por los grandes ríos y a lo largo de las costas. Algunos eran de gran tamaño: en el siglo XIII, Marco Polo hablaba de juncos provistos de un puente bajo el cual existían " *sesenta pequeños camarotes amueblados, uno para cada mercader*". El diseño, por otra parte, no había cambiado durante muchos siglos.

Veleros de cinco mástiles se desplazaban por los ríos de Caray cuando Europa sólo conocía primitivas balsas de troncos. El timón, la brújula, puentes y camarotes pertenecían al equipo corriente de una embarcación china, mucho antes de que las flotas occidentales llegasen a tan alto grado de desarrollo, y fue, sólo gracias a los árabes, quienes durante milenios hicieron de intermediarios entre Oriente y Occidente, que la navegación europea comenzó a desarrollarse definitivamente.

Los propios árabes dominaban el comercio con Oriente durante la Edad Media: traficaban entre China y Occidente en suntuosos barcos, equipados con brújulas chinas y ricamente adornados. En Bagdad, una de sus capitales, en una época en que su imperio abarcaba desde España hasta la India, confluían sedas y jades chinos, especias de Sumatra, tinturas traídas de la India, rubíes, pieles, esclavos, miel, mercancías llegadas desde Rusia, Escandinavia y Asia Central. Con barcos adquiridos en Levante y marineros egipcios y sirios, los árabes pudieron conquistar, en el siglo IX de nuestra era, Chipre, Creta y Sicilia, y sólo la flota bizantina les impidió apoderarse de Constantinopla.

Sobre los escombros del Imperio Romano, entretanto, descendía la bárbara noche medieval. Mientras Constantinopla se enorgullecía de sus "dromons", grandes galeras birremes impulsadas por un centenar de remeros, equipadas con "fuego griego" para incendiar las naves enemigas, y los árabes protegían sus naves con planchas metálicas, dando nacimiento a los primeros acorazados, los descendientes de Grecia y Roma se hundían en la barbarie venida desde el Norte. El fin de la estirpe carolingia marcó el eclipse de la civilización occidental, dejando el campo, y los mares, a Bizancio y a los árabes.

Pero desde el Norte comenzaron a llegar nuevos marinos, exploradores y mercaderes: hombres altos y barbudos que traían pieles, esclavos, dientes de foca desde sus guaridas perdidas en las latitudes septentrionales de Escandinavia. Desde finales del siglo VIII de nuestra era, sus "drakkar", largos y esbeltos barcos con proa de dragón, habían explorado las islas del Atlántico Norte, las Faeroe, las Shetland, Irlanda, Islandia, Groenlandia... Con el correr del tiempo llegarían a Rusia, donde les llamaban "varegos", al Norte de Francia, Inglaterra, a todos los mares conocidos; en Italia implantarían un imperio que llevaba el nombre por el que los conocían los pueblos europeos: normandos, hombres del Norte.

Estos fabulosos marinos escandinavos, tal vez los más grandes exploradores marítimos de la historia, son recordados hoy con un nombre que resuena en los ecos salobres de los grandes océanos: los vikingos, herederos de los navegantes de la antigüedad, símbolo perenne de la pasión humana por el mar, los barcos y la navegación.

Vikingos

Los bárbaros nórdicos pusieron pie en América cuatro siglos antes que Cristóbal Colón. Haciendo de los mares un camino real y de los ríos, senderos. Los "Hombres del Fiordo" conquistaron casi media Europa entre los siglos IX y XI. (Barros, Sergio. *Historia de la navegación*.)

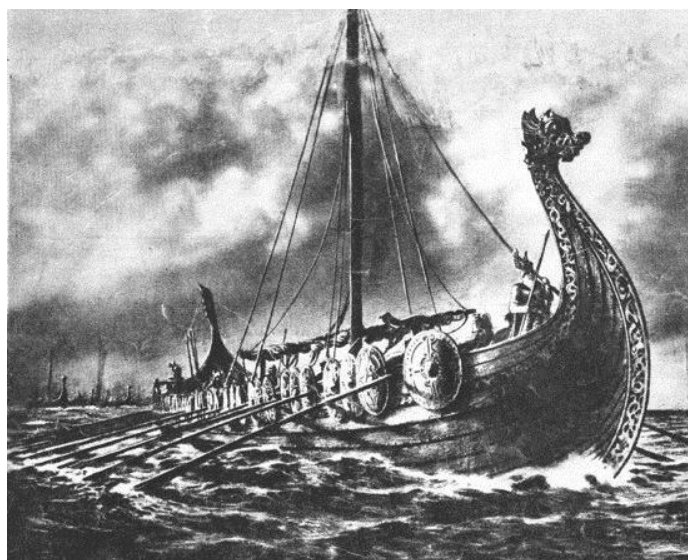


Figura 11: Barco vikingo

Uno de los pueblos de navegantes más notables, no sólo de la Edad Media, sino que de toda la historia del mundo, fue el de estos "*hombres del Norte*" o normandos, más conocidos como vikingos, palabra que literalmente en antiguo escandinavo significa "el que frecuenta un fiordo". Procedían de las regiones escandinavas, Suecia, Noruega y Dinamarca, y constituyeron el más importante núcleo de invasores, que cual plaga de langostas se lanzó sobre el continente europeo durante el transcurso del siglo IX, tras el desmembramiento del Imperio Carlovingio. Los vikingos eran muy semejantes a los bárbaros germanos que habían convergido sobre Roma en siglos pasados, tanto racialmente como en los aspectos de organización social, religión y costumbres. Sin embargo, la gran diferencia con aquéllos fue que sus hordas guerreras operaban fundamentalmente por mar.

Ante todo, los vikingos fueron intrépidos marinos que, en frágiles naves de unos 25 metros de largo y con tripulaciones de 60 hombres cada una, no

vacilaron en aventurarse a vela y remo por los mares del Norte e introducirse en los grandes ríos navegables de Europa, realizando asaltos rapidísimos que les permitían retornar a sus tierras cargados de botín. Pero muy pronto estos osados aventureros dejaron de lado los apresamientos en el mar y comenzaron a saquear las ciudades costeras, instalándose en ellas y emprendiendo la conquista de los países en que habían desembarcado. Y como si esto no les bastara, abordaron seguidamente empresas náuticas de largo aliento, descubriendo nuevas tierras hacia el occidente y llegando incluso a realizar la portentosa hazaña de atravesar el Atlántico y poner pie en tierras americanas, como hemos adelantado anteriormente, nada menos que cuatro siglos antes de que Cristóbal Colón llegara a América.

1.2.Evolución de la jarcia

Como se ha visto, en la antigüedad las naves dependían de los remos para largas travesías, ayudados cuando existían vientos portantes, al cargar las velas cuadras colocadas en el centro de la embarcación. (Yates. *Barcos de vela*; Brunori Albergotti, Roberto. *Historia de los principales barcos desde la Edad Media hasta el galeón.*)



Figura 12: Vela cuadra

Los aportes de los chinos a la navegación a finales del siglo XI, provocaron grandes cambios en la construcción de embarcaciones en Europa. El uso de navíos con varios mástiles se considera también una aportación más de los chinos.

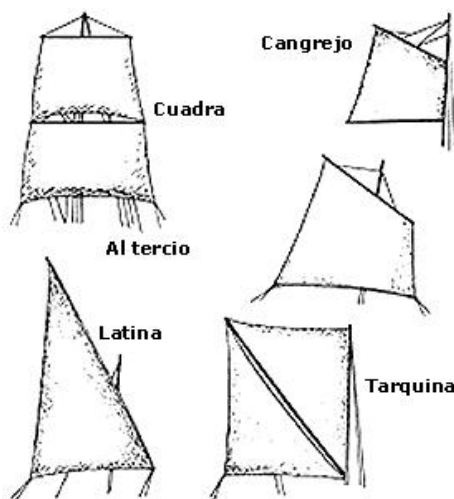


Figura 13: Evolución velamen

En el afán de poder navegar en contra del viento y como una evolución de la vela, aparecen las velas triangulares, también llamadas latinas, de cuchillo o áuricas. Éstas permitían entonces ceñir el viento, lo cual permite navegar en contra de la dirección de éste, en ángulos menores a los 90 grados, inclusive llegando hasta los 45 grados.



Se cree que el origen de la vela triangular data del siglo III, en el océano Índico, aunque no es del todo conocido. La vela latina posiblemente fue de origen árabe o polinesio, de ahí se deriva la llamada vela latina mediterránea y vela latina de las Bermudas o bermudina.

Figura 14: Vela latina

En el siglo XIII la vela latina es de uso común en el Mediterráneo y debido a la influencia nórdica se presenta una corriente del uso de la vela cuadra nuevamente.

A partir del siglo XIII; se hace notoria cada vez más la construcción de navíos de más de un mástil. La Coca, embarcación que existió durante cinco siglos (XIII-XVIII), usaba al principio una sola vela cuadrada, llegando a alcanzar hasta cuatro mástiles en el siglo XVIII, con velamen siempre cuadrado.



Figura 15: Coca

Durante el siglo XV se hace cada vez más habitual en Inglaterra el buque de dos y tres palos, al principio la disposición de los mástiles era muy cerca de la proa y la popa y sólo llevaban velas cuadradas. Fue evolucionando el tamaño de las velas y el número de los mástiles, llegando a ser usuales los barcos de tres mástiles. La vela latina fue la primera vela de cuchillo en el mundo, llegando a ser muy popular tanto en el Mediterráneo como en Oriente Medio.

La Carraca hizo su aparición en la primera mitad del siglo XV en los países meridionales de Europa como evolución de la coca de tipo nórdico. España y Portugal, en pleno periodo de expansión marítima, necesitaban un tipo de barco más robusto y grande para comerciar y proteger las rutas comerciales hacia Flandes y el Mediterráneo y, más adelante para atravesar el Atlántico. La coca nórdica era insuficiente para tales propósitos por lo que se incorporaron modificaciones estructurales que dieron lugar a la Carraca.

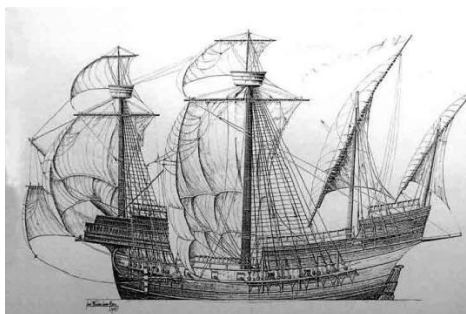


Figura 16: Carraca



La Santa María, uno de los veleros que utilizó Cristóbal Colón en el descubrimiento de América, ha sido considerada por los especialistas como la remota antepasada de los veleros de tres mástiles, aunque se habla de ella como de una carabela. Colón, al referirse a ella en sus descripciones la llamaba la nao, mientras que a La Pinta y a La Niña las llamaba carabelas. Este modelo de barco, en contra de la creencia popular, es de origen portugués y no español.

Figura 17: La Santa María

La carabela era una nave sencilla y ligera, distinguiéndose dos tipos: las carabelas latinas que tenían en su aparejo únicamente velas latinas; y las carabelas redondas, que presentaban en el mástil de proa una vela cuadra; algunas carabelas llevaban 2, 3 y hasta 4 mástiles, siendo La Pinta y La Niña carabelas latinas.

A partir del siglo XVI tuvo lugar el auge de los barcos de vela en continua transformación. Fue un siglo de experiencias, en cuyo transcurso el hombre aprendió que las embarcaciones en el mar obedecen a reglas precisas que no admiten errores de cálculo.

Galeon



Los galeones que aparecen a mediados del siglo XVI fueron una mezcla de la carraca, embarcación pesada con la proa y la popa terminadas en punta, y de la esbelta galera veneciana. Los galeones tenían una línea más elegante que las carracas y la proa cuadrada. La transición de la carraca al galeón fue el último gran "salto tecnológico" en los barcos de vela.

Figura 18: Galeón

A mediados del siglo XVII se producen dos fenómenos que revolucionarían el arte de la guerra en el mar:



Figura 19: Navío de línea

En primer lugar, las marinas de guerra adoptan la disposición de línea de combate como forma de afrontar las batallas lo que supone un cambio táctico que da nombre a los grandes buques de la época, los "Navíos de Línea". Para lograr esto era preciso que todos los buques que componían la línea pudieran desarrollar la misma velocidad, fueran igual de maniobrables y dispusieran de suficiente armamento.

En segundo lugar, las renovaciones técnicas permiten barcos más grandes y mejor artillados. Se adopta el sistema de doble cuaderna que confería al armazón mayor resistencia y el doble armazón, llegando el grosor de los costados, con frecuencia, a 60 cm. A principios del siglo XVIII se generaliza en Europa el timón de rueda, en lugar de la barra horizontal como medio de gobierno del navío; se comienzan a utilizar también las bombas de achique y el aparejo se estandariza suprimiendo algún tipo de velas y creando otros como el estay. El desplazamiento oscilaba entre las 1.200 TM, en los de 3ª clase, hasta las 4.000 TM en los mayores

Los navíos de línea eran la fuerza principal de una escuadra. Disponían de dos o tres baterías de cañones situadas en las cubiertas, lo que le otorgaba un gran poder ofensivo, pero como contrapartida, eran lentos y de maniobra complicada.

Durante el siglo XVIII las fragatas comenzaron su apogeo en todas las marinas, si bien las primeras habían hecho su aparición en el siglo anterior.



Figura 20: Fragata HMS Surprise

Se buscaba un barco robusto y con un considerable poder ofensivo pero más maniobrable y rápido que los grandes navíos de línea. La fragata era por tanto un navío de menor porte y con una sola batería. Su aparejo era similar al de los grandes navíos: tres palos y todos ellos con velas cuadradas, excepto la cangreja del palo de mesana.

La fragata tipo de principios del XVIII solía desplazar entre 200 y 300 toneladas e iban armadas con 30 o 40 cañones. Más tarde aumentaron su tonelaje y armamento y prácticamente llegaron a igualar a los navíos de línea menores cuando comenzaron a montar una segunda batería.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX aumentaron su desplazamiento hasta las 800 y 1.200 toneladas, y en 1830 sobrepasaban las 1.500 toneladas convirtiéndose en las unidades principales de cualquier armada. Ello no quiere decir que, además de las fragatas tipo, existieran fragatas mayores casi equiparables a los navíos de línea.



La diferencia entre un galeón del siglo XVI y un paquebote del siglo XIX, como el famoso Cutty Sark o el France II es pequeña, aunque el rendimiento de este último era muy superior.

Figura 21: France II

La evolución gradual a partir de los primitivos galeones dio lugar a un aumento del tamaño y del número de las velas, así como a la introducción de las velas triangulares entre los mástiles.

En el siglo XVIII; el aparejo se hace más funcional, para tomar rizos efectivos a las velas, mayor prestancia para ceñir, etc. A fines del siglo XVIII se empieza a usar una cuarta vela sobre el juanete, llamada sobrejuanete. Terminando este siglo la navegación a vela es más compleja, pues se utilizan más aparejos, mayor número de mástiles que van de dos hasta siete en algunos veleros.

La mayor parte de los navíos de línea y fragatas ya presentaban sobre todo aparejo redondo, añadiendo velas triangulares en los palos de mesana y bauprés. El mayor navío de línea en el mundo fue el Santísima Trinidad, construido en la Habana Cuba en 1769. El navío de línea desapareció de la armada española en la primera mitad del siglo XIX.



Figura 22: Santísima trinidad



Figura 23: Goleta Thomas W. Lawson

A partir de mediados del siglo XVIII, los barcos de vela occidentales adoptaron muchos y diversos aparejos, de 2 a 6 mástiles, o incluso 7, como en la goleta Thomas W. Lawson, con todas las velas de cuchillo.

En la primera mitad del siglo XVII se denominó corbeta a una embarcación alargada de un sólo mástil y dotada de remos. Su origen eran los antiguos navíos mercantes de la Roma Imperial de quien adoptaron su nombre.

La corbeta de guerra surge a mediados del siglo XVIII perdiendo los remos y portando aparejo de velas cuadradas. Al principio llevaban dos palos con una vela (cebadera) en el bauprés. Más adelante, su aparejo se elevó a tres palos de gran altura con velas cuadradas a las que se añadió una vela de cangreja en el palo de Mesana.



Figura 24: Corbeta

Iban armadas con una sola batería en el puente de cubierta, oscilando su potencia de fuego entre las 16 y las 26 piezas.

En realidad eran pequeñas fragatas a las que se les dotó de mayor superficie en el velamen. Existían dos clases, la corbeta y la corbeta ligera. Esta última derivó, con el transcurso del tiempo, hacia el aparejo de una sola vela, siendo el origen del denominado cúter.

Su misión básica era el reconocimiento, escolta, transmisión de órdenes y el corso.

Fueron los primeros navíos a los que se incorporó el vapor y la hélice.

El bergantín, surgido a finales del S. XVII, se caracterizaba por su alta arboladura y su gran superficie vélica; era un barco rápido y manejable, al que se dotaba con catorce a dieciséis cañones, siendo utilizado como aviso o corsario.

El bergantín aparejaba velas cuadradas en sus dos mástiles, con una cangreja en el palo mayor; también llevaba velas de estay, foque y cebadera en el bauprés. Como novedad presentaba grandes orificios en la parte inferior de las velas para que el agua desapareciese rápidamente de su superficie.



Figura 25: Bergantín y Goleta

Al lado del bergantín hemos de situar a la goleta. Las misiones encomendadas a la goleta eran las mismas que las del bergantín. Su diferencia básica era el tipo de arboladura y aparejo. Mientras el bergantín aparejaba velas cuadradas, la goleta las llevaba de cuchillo. Más adelante, los aparejos de estos navíos se combinaron dando lugar a subclasificaciones como el bergantín-goleta (que aparejaba velas cuadradas en el palo de mesana, y velas de cuchilla en los restantes), la goleta de gavia (con velas de cuchillo en todos los palos , salvo una vela cuadrada en la gavia de mesana), goletas mixtas (con velas de cuchillo y cuadradas en todos sus mástiles)

A principios del siglo XIX, la marina de guerra impulsada a vela se compone de navíos de diferentes categorías, clasificados según su importancia y su armamento, así como de fragatas, encargadas de proteger los convoyes cuando se dirigían a puertos lejanos. Estas fragatas llevan 60 cañones como máximo y una sola batería en el casco, mientras las corbetas y los bergantines sólo los llevan en la cubierta.

El clípper, buque mercante que apareció a mediados del siglo XIX, fue un velero muy eficiente, el más rápido y el más hermoso, pero también el más efímero. Apareció en Estados Unidos hacia 1820, y ya a finales del siglo ya se le consideraba un buque anticuado.

Los clípper fueron contruidos esbeltos y ligeros para alcanzar grandes velocidades; tenían espacio para la carga, pero la superficie de su velamen era enorme. Su existencia respondía a varias necesidades: la fiebre del oro en Australia y en California, de 1849 a 1851; el comercio del té con China y, a partir de 1870, el comercio de la lana y de cereales con Australia.

Con los avances tecnológicos del vapor, el transporte a vela queda relegado a un plano de aficionados y amantes de este tipo de navegación. Ya no existe función laboral y de la navegación a vela se pasa a una lucha gratuita, a recorrer los mares, a buscar la velocidad de la embarcación, a la resistencia con el medio...la vela pasa a ser un deporte. Schiller en sus "Cartas sobre la educación artística del hombre" ya nos anuncia que la vela, convertida en deporte, al estar libre de la necesidad comercial, del objetivo del transporte, permite al hombre navegar sin fin alguno, por su propio desafío, desplegar sus propias fuerzas gratuitamente. El arte de navegar es más que la simple navegación.

En el S.XX los aparejos náuticos se han beneficiado de muchos avances realizados por la industria aeronáutica. Las antiguas velas flexibles de lona o loneta se han cambiado por otras más rígidas que permiten, alineadas con el viento, tomar impulso según el mismo principio físico que permite la sustentación en las alas de un avión. Son así capaces de ceñir al viento de forma mucho más cerrada que cualquier vela flexible.

El resto de componentes que conforma el aparejo mantiene su existencia, pero se adoptan otros materiales para las de vergas y mástiles, donde reinaba la madera y que son sustituidos por el acero, el aluminio o más recientemente por fibras de vidrio o de carbono. También en los elementos encargados de soportar la estructura se ha modificado el material, desde los cabos hasta los cables de acero y las barras continuas de acero e incluso a la nueva incorporación del spectra, para volver a construir la jarcia con un cabo de extrema resistencia con un peso muy reducido.



Figura 26: Comparativa aparejos

2. Descripción aparejo actual

Para aprender un poco la nomenclatura náutica se tienen las siguientes figuras (*Geometría del palo, tensión bajo control*. Revista YATE. Julio 1996, número 358) donde poder ver las distintas partes del aparejo y la jarcia para un sloop (barco con un solo mástil) de tipo Marconi (velas de cuchillo, mayor y génova) y el glosario del final con una breve descripción de cada término.

2.1. Jarcia firme

REGLAJES Y FLEXIONES LONGITUDINALES



Podemos variar la caída del palo de distintas maneras. Por ejemplo, manteniendo fija la fogonadura, adelantando la coz, alargando el estay y acortando el baquetay haremos el barco más ardiente.



Sólo con acuar por popa el palo al Pasar por la fogonadura ya le damos preflexión al palo. Si además retrasamos la coz, la preflexión será más pronunciada.



Al navegar sólo con vela en pro, palo tiende a invertirse, situación que es muy peligrosa. Debemos cazar baquetay, e incluso armar el amantillo en la botavara, y dar tensión a la escota de mayor.

El estay es el cable que impide la caída del palo hacia popa, siendo el estay de popa o backstay el que le impide caer hacia proa. Esta pareja es la encargada de mantener el palo en su posición longitudinal, ya sea vertical o con una caída prefijada. Pero la tensión aplicada se traducirá en compresión en el tubo. Si el estay es graduable podremos dar caída al palo, otorgando un carácter más ardiente al barco al retrasar el centro vélico.

Dependiendo de dónde arraigue el estay en el palo, se define un aparejo a tope de palo si encapilla en la perilla, o fraccionado si arraiga por debajo de ésta.

La jarcia encargada de aguantar el palo transversalmente recibe el nombre de obenques. El de babor impide la caída del palo hacia estribor, el de estribor, que no caiga a babor. A grandes rasgos, ya tenemos sujeta la arboladura.

Más adelante hablaremos de otros elementos necesarios en la jarcia, dependiendo de la geometría que presente la arboladura, como pueden ser las burdas, el Babystay o los violines.

Todos los arraigos de jarcia deben permitir el movimiento de los terminales para evitar roturas por rotación y torsión.

Figura 27: Jarcia firme

2.1.1. Jarcia continua

Se denomina así a los obenques que son enteros, desde el cadenote (landa) hasta el arraigo en el palo. Sobre cubierta existe un tensor para cada obenque. Normalmente la jarcia continua es de cable y, cuando pasa por el extremo de la cruceta, es muy importante que se fije sobre ella. Recalcando este punto puesto que, en la jarcia de sotavento, que se mueve con los movimientos del barco, puede desplazarse la cruceta del punto óptimo de trabajo sobre el obenque y, al virar, quizás la cruceta no trabaje perpendicular al cable, se fugue y se acabe desarbolando.

La jarcia de cable es más elástica y disfruta de más años de vida. Si el cable es de galvanizado, hasta diez años, y si es de inox hasta siete. Además, avisa antes de faltar, pues acostumbra a romperse algún hilo, denominado sargento, antes de partirse el cable definitivamente. Ante la aparición de un solo sargento, sobre todo cerca del terminal, no dudar en cambiar el cable.

Definiendo, según el número de crucetas, obenques altos, obenques medios y obenques bajos. Como ya se ha dicho, cada obenque acaba en un tensor sobre cubierta, por lo que el trimado se puede realizar desde abajo, sin tener que subir al palo. Es la jarcia típica en embarcaciones de crucero.

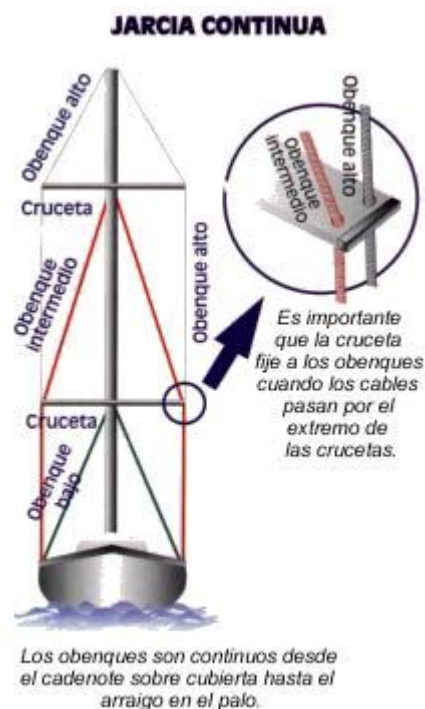


Figura 28: Jarcia continua

2.1.2. Jarcia discontinua

Es una jarcia que va por tramos. Acostumbra a ser de varilla, y su uso está reservado para embarcaciones de regata. Su elasticidad es mínima, por lo que las prestaciones del aparejo son superiores a las obtenidas con la de cable. Su vida es muy inferior, sólo garantizada durante tres años. Aquí se pierde la nomenclatura de altos, medios y bajos para definir diagonales y verticales por tramos, empezando desde cubierta. En el primer tramo encontramos el D1 y el V1. El V1 termina en una cazoleta que descansa en el extremo de la primera cruceta. En la parte superior de esta cazoleta arraigan el D2 y el V2. Y así

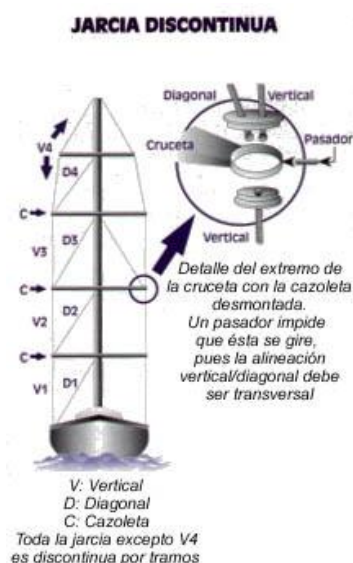


Figura 29: Jarcia discontinua

sucesivamente, siendo el último vertical una varilla que nace en la penúltima cruceta, pasa por la última y arraiga en el palo.

Cada diagonal tiene su tensor, y uno sólo sobre cubierta asiste al sistema de verticales. Cada diagonal también tiene un pequeño tensor sobre la cazoleta.

A diferencia de la jarcia continua. El trimado del palo exige izar un tripulante que pase por cada cruceta regulando los diagonales lo que, junto a la imposibilidad de trimado de verticales con el palo en tensión, hace que el sistema sólo se use en barcos regateros.

La tensión de jarcia se varía desde la coz mediante gatos hidráulicos y pletinas, nunca en marcha. Navegando, como ya hemos dicho, sólo se triman los diagonales.

Todos los terminales de los distintos tramos de la jarcia permiten la rotación de las varillas, ya que en caso contrario se deteriorarían por torsión

2.2.Velas

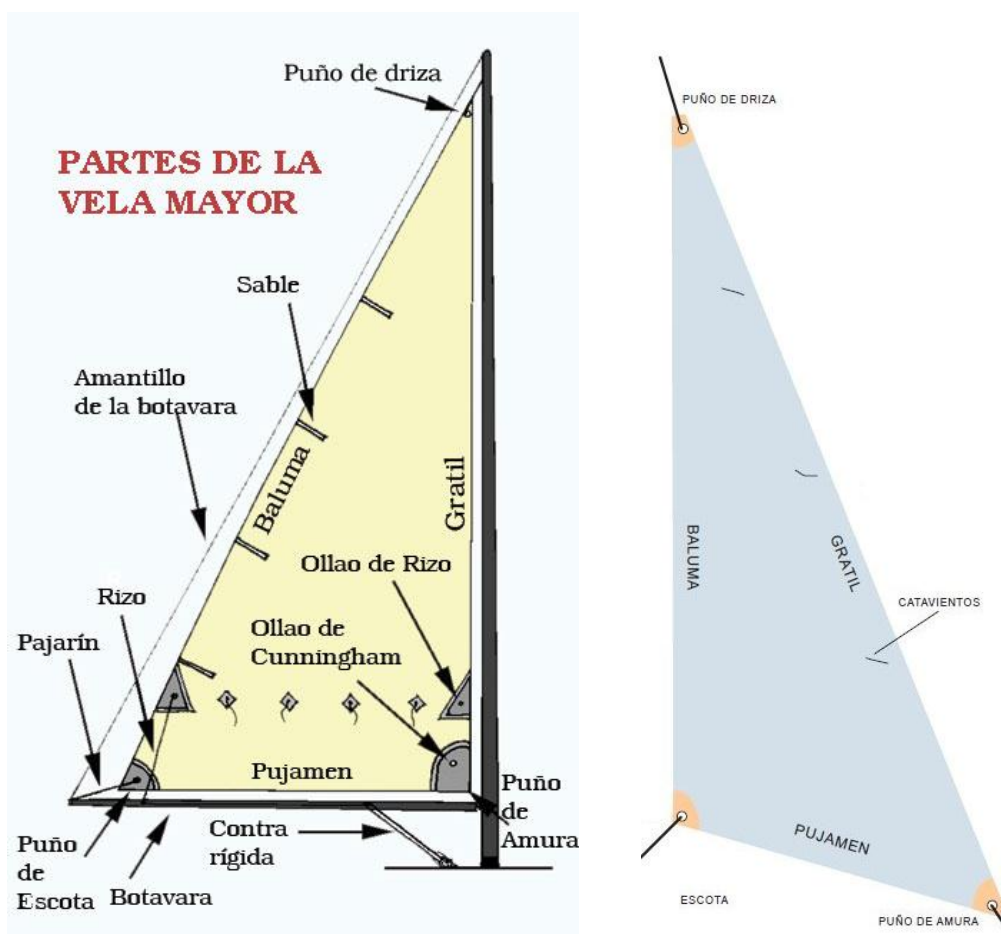


Figura 30: Partes mayor y génova

Habr  elementos que no se tendrán en cuenta como son los destinados a un trimado experto (cunningham) o a la toma de rizo que sucede cuando se reduce superficie vélica por exceso de viento; el estudio realizado será con un viento fuerte en el que seguramente debiera ir con algún rizo, pero así se somete a la estructura a esta carga para conocer sus límites.

Los puños de driza son para izar la vela hasta su posición vertical y dar tensión a los gratiles, los puños de escota permiten aplanar o embolsar las velas en función del ángulo de viento que exista, la intensidad, el trimado, etc. Por último, los puños de amura son el v rtice para los dos anteriores, siendo puños fijos.

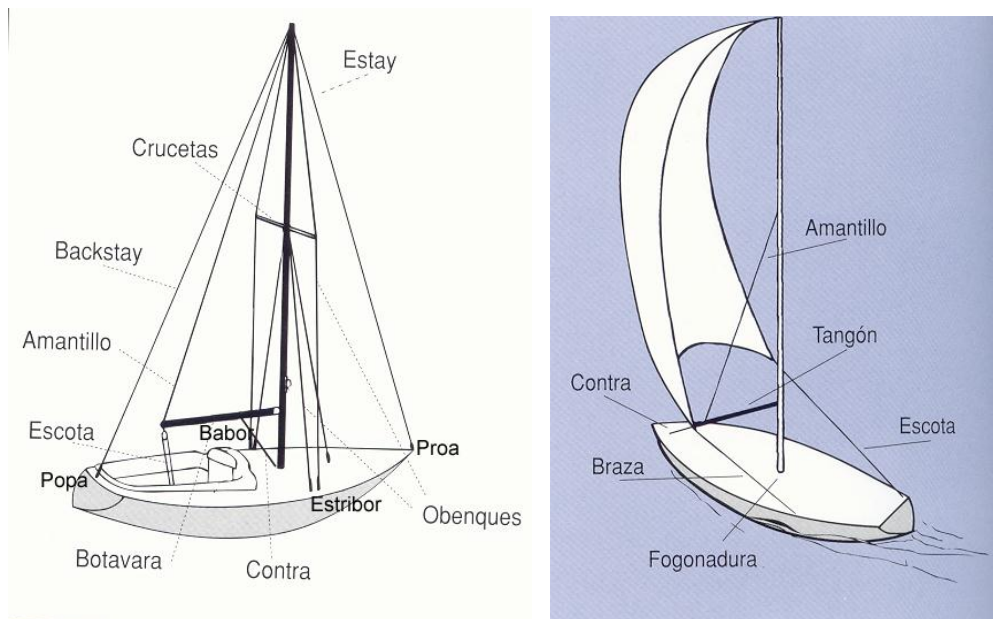
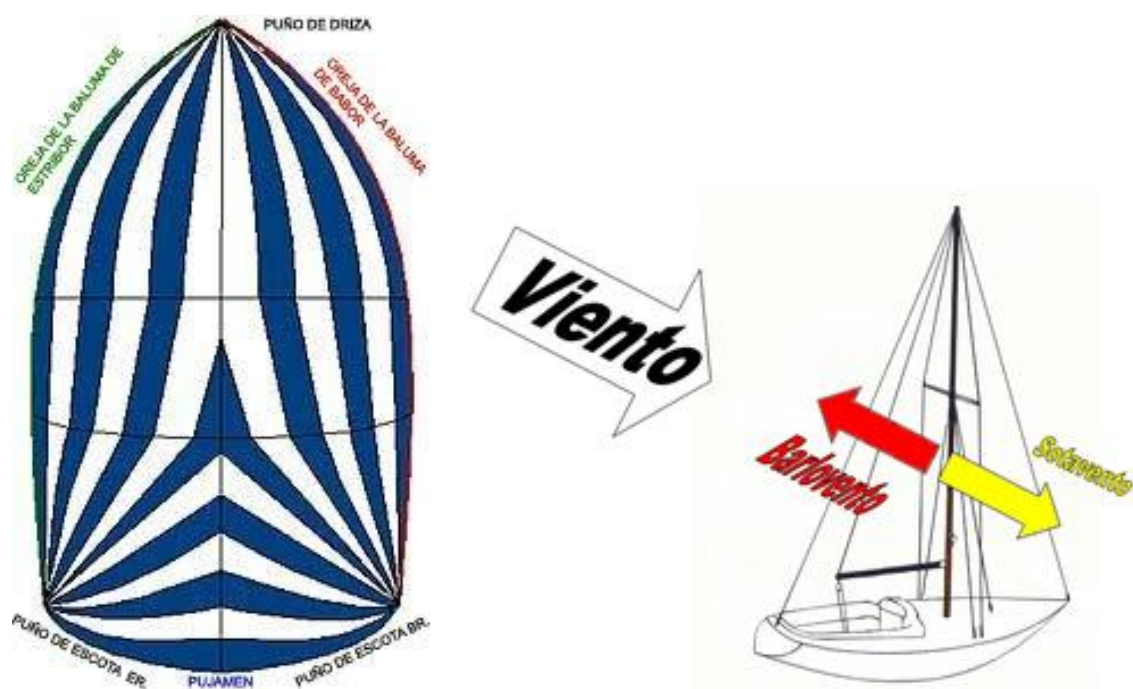


Figura 31: Aparejo y spi



El amantillo de la botavara sirve para mantener horizontal ésta cuando la vela mayor no se encuentra izada por lo que no será objeto de estudio.

Para mantener el tangón en una posición horizontal se emplea el amantillo para evitar que descienda y sus contras para evitar su ascenso; la braza es el cabo que sujeta el puño de escota de barlovento (por donde entra el viento) pasando por el tangón.

Todas las velas tienen 3 zonas que son:

- Pujamen: es la parte inferior de la vela
- Balumas: son el borde por el que el viento abandona la superficie de la vela
- Grátil: es el borde de ataque al viento, el spi no tiene grátil sino que cuenta con dos balumas, una a cada lado.

2.3.Partes del aparejo

2.3.1. Coz o base del palo

Este es el nombre que recibe la base del palo. Tradicionalmente el palo atraviesa la cubierta por el agujero denominado fogonadura, y descansa sobre una pieza destinada a tal efecto llamada carlinga. La carlinga permite variar el punto de descanso de la base del palo, produciendo una caída más o menos pronunciada del palo hacia popa, hacia proa o que trabaje completamente vertical. Manteniendo fija la fogonadura y variando la coz, podemos cambiar la caída del palo siempre que también modifiquemos el estay y backstay.



En los aparejos que descansan sobre cubierta es necesaria la colocación de un puntal que descargue sobre la quilla o sobre la zona reforzada del fondo que lo recibe. La coz sobre cubierta obliga a dotar a la cubierta de un basamento que impida la fuga del palo en condiciones de navegación dura, y es recomendable reforzar la coz con un zuncho perimetral que no aplaste y abra el material del perfil, pues la flexión del tubo no reparte la fuerza por igual en toda la coz.

2.3.2. Fogonadura

Es la abertura por donde el palo atraviesa la cubierta para descansar sobre la quilla. Esta zona sobre la quilla es en los veleros actuales la más reforzada del barco, pues recibe las más altas tensiones. Estas tensiones son la compresión del palo, el esfuerzo de los cadenotes (landas) donde arraigan los obenques y la sujeción del ala de la quilla.

La tensión de la jarcia que sujeta al palo implica la compresión del tubo, por lo que tiende a flexar combando el perfil. Si el palo descansa sobre cubierta, esta curvatura parte desde la misma coz, pero si el palo descansa sobre la quilla el tubo queda sujeto por la fogonadura, disminuyendo el esfuerzo en el tramo inferior. Siempre será más inseguro un palo que descansa sobre cubierta, pues existe un peligro de desplazamiento de la coz. Como es lógico, un puntal interior deberá conducir el esfuerzo de compresión hasta la quilla.

La fogonadura presenta siempre problemas de estanqueidad, y además deberá disponer de buenas cuñas para impedir movimientos, así como de refuerzos interiores que repartan las tensiones. Estos problemas se suprimen en los palos sobre cubierta, motivo por el cual acostumbran a arbolar este tipo de aparejo las embarcaciones de crucero y no las de regata.

Manteniendo las longitudes del estay y backstay, y sin variar la posición de la coz en la carlinga, podemos acuñar el palo en la fogonadura por popa. En este caso el palo adquiere la llamada preflexión, aunque existen otros métodos para preflexionar el palo. Toda preflexión incrementa el riesgo de rotura.

2.3.3. Mástil

Que un palo de madera es macizo es irreversible. Un viaje por el mundo de la física permite deducir que en un tubo macizo las fibras interiores colaboran poco con su resistencia, observando en su parte cóncava un trabajo de compresión, y en su convexa uno de extensión, quedando casi inerte el alma interior. Sólo hace falta observar cómo la naturaleza resuelve este problema, ahuecando los huesos. Casi la misma resistencia, mayor flexibilidad y peso inferior. Este recurso es aplicable al tubo de la arboladura: se logra reducción del peso y aumento de la elasticidad.

Desde las primeras secciones metálicas a los finísimos aparejos de regatas se ha producido toda una revolución. Para comprender un poco esa tecnología, los diseñadores se basan en el concepto de "momento de inercia".

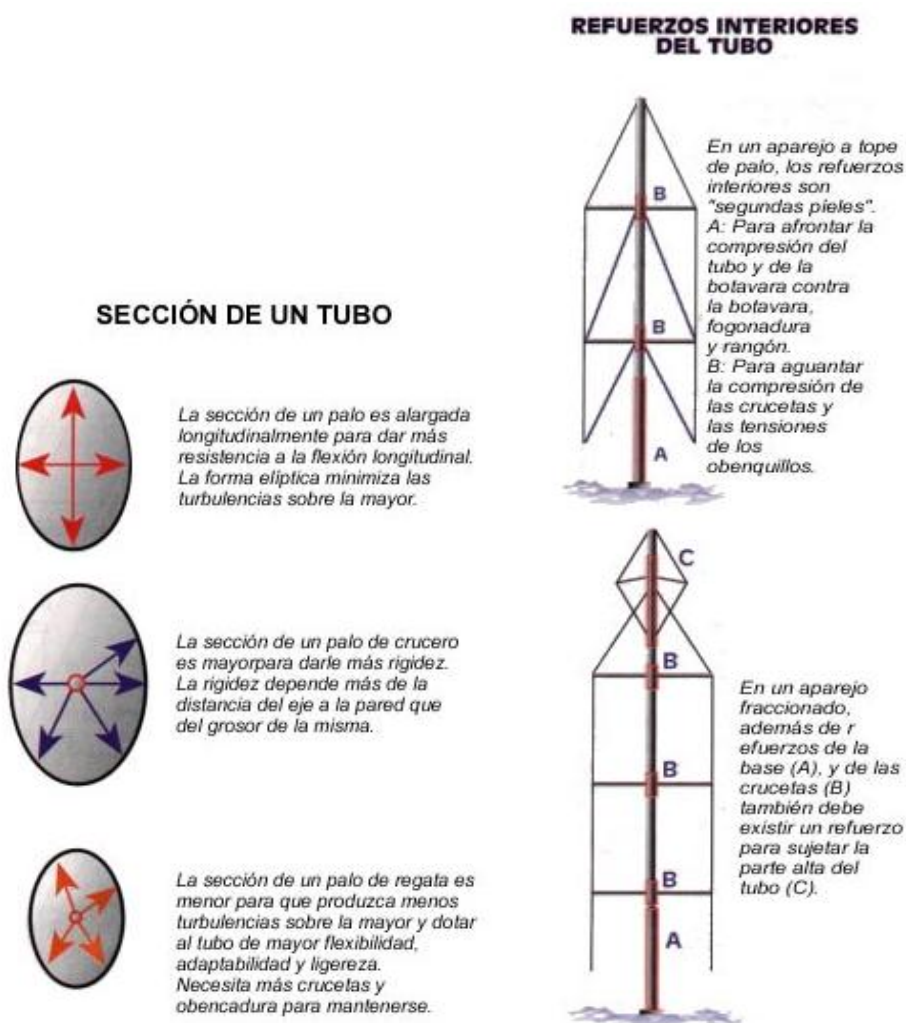
La resistencia del tubo es proporcional a la superficie del material en sección y a la distancia del material respecto al eje del tubo, pero con la sorpresa de que la distancia actúa al cuadrado. De manera que influye más el

diámetro del tubo que el grueso de la pared. Así resulta que un tubo de mayor sección posee una pared más fina.

La búsqueda del máximo rendimiento obliga a usar secciones más finas, que evitan las fatales turbulencias de viento en la mayor, aumentan la elasticidad y minimizan el peso. Pensemos que el centro de gravedad de la arboladura está varios metros por encima de cubierta, lo que obliga a lastrar mucho el barco para mantener los momentos de adrizamiento adecuados.

Aguantar un palo fino de sección exige una proliferación de la obencadura, además de dotar al tubo de refuerzos puntuales para resistir la compresión. Es normal reforzar desde la base hasta encima del pinzote de la botavara y también las zonas de descarga de las crucetas con segundas y hasta terceras pieles interiores. Sobre todo en su paso por la fogonadura. Un palo queda más sujeto transversalmente, gracias a la obencadura y crucetas, que longitudinalmente. Por esta razón la sección es alargada, ya que pocos reglajes le asisten longitudinalmente.

Figura 33: Sección mástil



Es muy importante que el palo no flexe nunca hacia proa, proyectando la panza hacia popa, fenómeno denominado inversión. Ni el diseño del tubo ni el del conjunto de obenques y crucetas están pensados para ello. Mucha atención: las consecuencias de una inversión pueden acarrear el desarbolado.

2.3.4. Crucetas

Son los pequeños perfiles que ayudan a sujetar el palo transversalmente. Debido a la pequeña dimensión de la manga en relación a la eslora, el ángulo de trabajo de los obenques impide una óptima sujeción lateral del palo. Matemáticamente, un cable necesita salir con un ángulo de unos 13° para que su función sea efectiva y no estalle por tracción, y es fácil comprender que, con este ángulo, la manga de los veleros tendría una dimensión excesiva.

Por esta razón, el obenque alto pasa por el extremo de una cruceta, distribuyéndose la sujeción a lo largo del tubo. Pero la tensión del obenque alto, transmitida mediante la cruceta, imprime una compresión que se traduce en una flexión en el tubo en la zona de la base de la cruceta. Para evitar esta flexión, la geometría obliga a dotar al sistema de un obenque bajo que tire de esta sección impidiendo la flexión del tubo.

Un barco de crucero arbola un palo fuerte, una estaca, por lo que requiere pocas crucetas, a veces sólo una. Un barco de regatas, en el que se busca el mínimo perfil, el mínimo peso y la máxima elasticidad del palo para adaptarlo a la vela y a las condiciones de viento, necesitará más crucetas para sostenerse. Pero siempre una cruceta precisará un obenquillo que contrarreste la compresión ejercida por ésta sobre el palo. A más crucetas, más obenquillos.

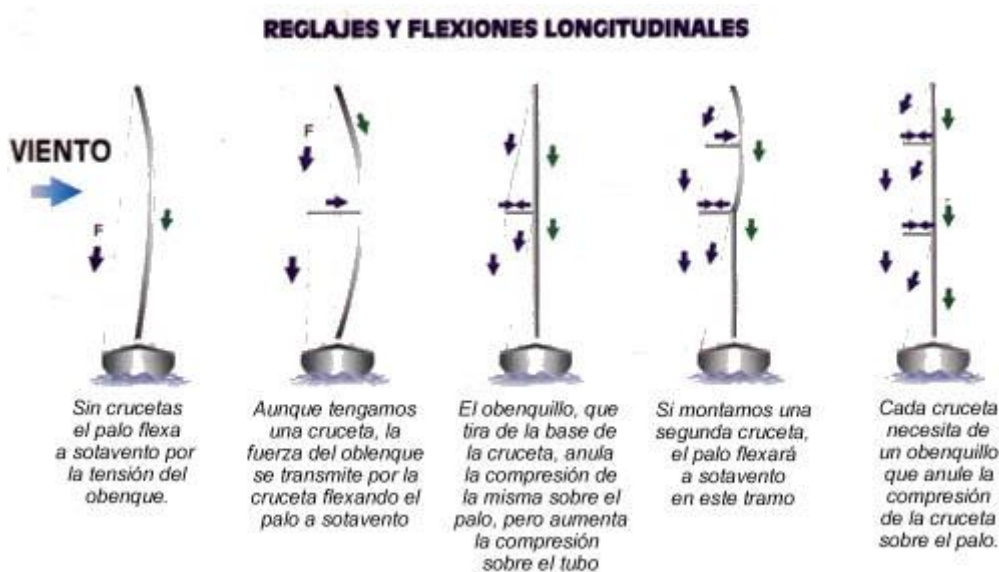


Figura 34: Reglajes crucetas

Otro factor muy importante a tener en cuenta en las crucetas es su ángulo respecto a crujía. Cuando las crucetas están a 90° desempeñan un papel de sujeción transversal, pero cuando se retrasan también influyen sobre la flexión longitudinal del tubo. En efecto, una cruceta retrasada conlleva el hecho de que el palo flexe hacia proa en ese tramo. Las crucetas perpendiculares permiten abrir más la botavara, pero se pierde control sobre la flexión longitudinal. Si el aparejo es a tope, aparece el denominado babystay o unos obenques bajos que tiran hacia proa desde la panza del tubo. En un aparejo fraccionado se acostumbra a dotar al palo de una ligera preflexión para evitar que se invierta el perfil, algo verdaderamente funesto para la vida del palo. Las crucetas retrasadas impiden la inversión, no permiten abrir tanto la botavara en popas al tocar la vela con ellas, pero aumentan la seguridad de la arboladura.

Las crucetas deben mantenerse fijas sobre el tubo, para poder transmitir correctamente las tensiones. Sólo en aparejos especiales muy sofisticados se les permite un cierto grado de libertad ascendente, pero nunca en sentido proa/popa.

2.3.4.1. Violines y diamantes

En los aparejos fraccionados, toda la parte superior del tubo a partir del arraigo del estay, obenques y burdas, va por libre. Aunque las características del perfil permiten que no se rompa, se producen dos fenómenos. Primero, una caída a sotavento de la perilla empujada por la mayor. Y segundo, al cazar escota, la tensión en baluma desplaza la perilla a popa. Nunca podríamos trimar bien esa mayor, pues más que regular la vela nos traemos la perilla. Para solucionar esta cuestión existen los violines. Son dos pequeñas crucetas orientadas hacia proa por las que pasan unos cables o varillas que arraigan por debajo del estay y en la galleta. De esta manera queda controlada la parte superior del tubo.



Figura 35: Crucetas de violín

2.3.5. Burdas

Aunque no esté claro si pertenecen al grupo de la jarcia firme o al de la jarcia de labor, la misión de las burdas es sujetar el palo para que no caiga hacia proa y están emparentadas con el backstay.

En un aparejo a tope de palo, su función se limita a regular la forma del palo, impidiendo que flexe demasiado al fugarse la panza hacia proa debido a la compresión sufrida por el tubo cuando aumenta el viento.

Pero en el caso de los aparejos fraccionados su importancia es vital, pues sustituye al backstay en sus funciones de mantener el estay lo más recto posible en ceñida y sujetar el palo en popas. Son necesarias siempre dos burdas, una por cada costado, que se cazarán o largarán según la amura, delicada maniobra de la que huyen los amantes de la navegación de crucero, más aún en las trasluchadas. Siempre se caza la de barlovento y se larga la de sotavento.

La enorme flexibilidad de los palos de regata obliga a dotar al aparejo de unas burdas bajas, cuyo fin es trabajar la sección media del tubo, recuperando la panza. Las fuerzas de compresión aconsejan mantener al máximo la verticalidad del palo, pues en caso contrario pueden doblarse. Y ahí aparece la burda baja, para controlar ese pandeo.

Tanto la burda alta como la baja se trabajan desde el mismo cabo, van solidarias, aunque la tensión de la baja puede regularse con un aparejillo dispuesto a tal efecto o con un deflector en el palo.

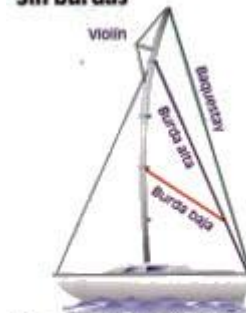
En los barcos de altas prestaciones, las burdas, que antiguamente eran de varilla metálica, son hoy de kevlar. Aparte de su resistencia, la propiedad más apreciada en las burdas es una elasticidad mínima. Si además conseguimos ligereza, las ventajas son indiscutibles. Estas son las características principales del kevlar: resistencia, ligereza y mínimo estiramiento. Aunque su principal enemigo es el sol, y por eso debe enfundarse para protegerlo de los rayos solares. También Aquiles tenía un defecto en los talones...

APAREJO FRACCIONADO



En estos finos aparejos, las burdas altas aguantan el palo y enderezan el estay. La burda baja controla la panza que aparece por la flexión del tubo, y el baquestay regula la parte superior de la mayor.

Sin burdas

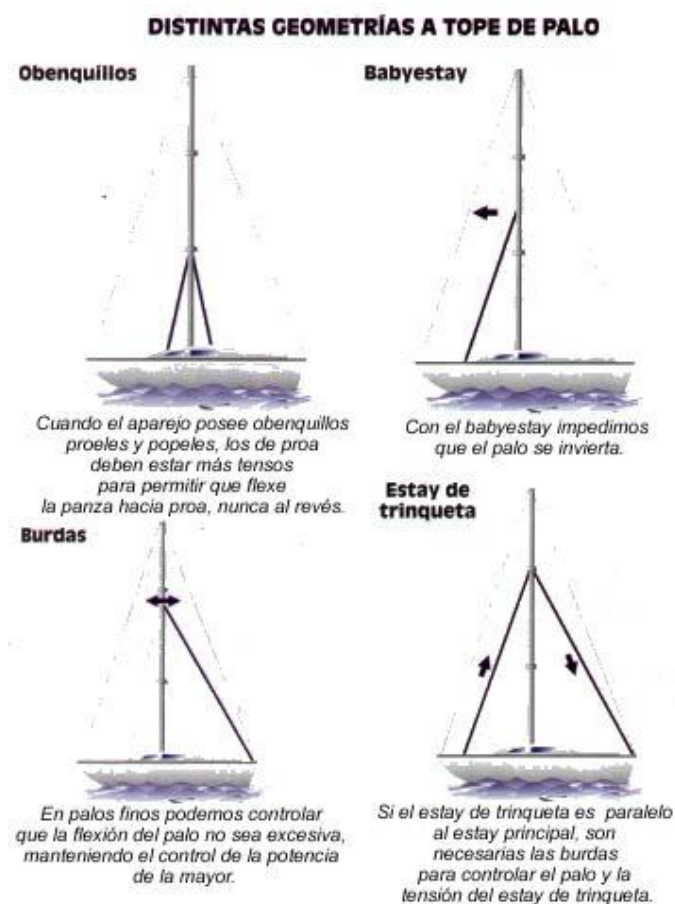


Son aparejos modernos y simples. La tensión del estay se regula con los obenques altos y crucetas retrasadas, que lógicamente hacen flexar la panza del palo a proa.

Figura 36: Burdas

2.3.6. Babystay

Pertenece al grupo de la jarcia firme, y se trata de un cable que arraiga en el tercio inferior del tubo y en el triángulo de proa. Su uso está concebido principalmente para aparejos a tope de palo, aunque en las grandes unidades de aparejo fraccionado también se encuentra. Su principal misión es impedir que el palo se invierta, tirando de la panza hacia proa. En aparejos antiguos a tope se estilaban unos obenquillos bajos proeles, es decir, que tiraban hacia proa, con el mismo fin, pero actualmente se ha impuesto el uso de un sólo Babystay. Una segunda misión está en consonancia con los obenques bajos. Cuando sube el viento y tiende a tirar todo el aparejo a sotavento, el efecto combinado de obenques bajos y Babystay hace flexar el tubo hacia proa manteniendo la verticalidad transversal del tercio inferior, evitando así el efecto cuchara y absorbiéndose una parte de la bolsa de la mayor.



Para que sea efectivo, el Babystay debe poder regularse durante la navegación, por lo que no se trata de un elemento estático como puedan ser los obenques.

Figura 37: Babystay



Figura 38: Primer campeón Volvo Ocean Race

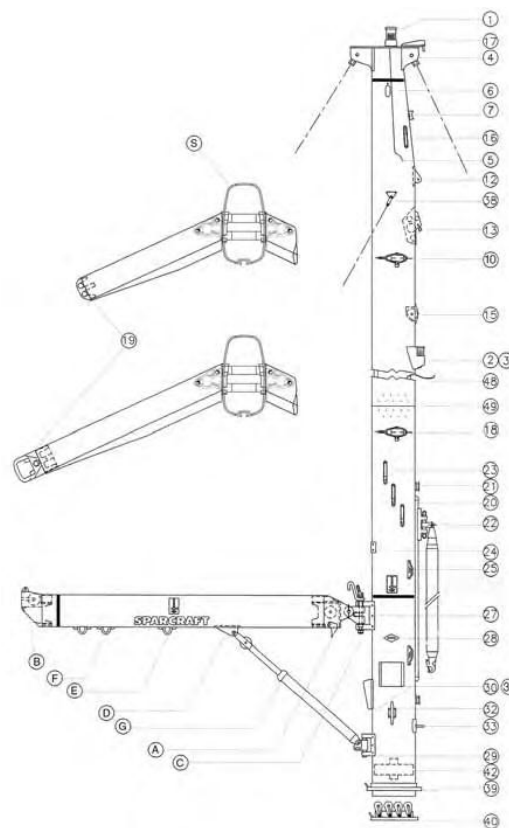


Figura 39: Modelo esquemático de mástil (Sparcraft)²

² Sparcraft. Performance engineering. Catálogo

3. Desarrollo

El modelo de partida es el aparejado básico de las embarcaciones de recreo actuales, consta de:

- Perfil de aluminio de diverso espesor en función de su tamaño (mástil o palo)
- Las velas, empleando un aparejo estándar, se adoptará el aparejo Marconi compuesto por una vela mayor, un génova y un spi.
- Los cables de acero, diferenciando los cables laterales de los proeles (delante) y popeles (detrás) siendo los primeros los denominados obenques y dentro de ellos los obenques intermedios y los altos; los cables popeles son el back-estay y el proel el estay.

Como en Ansys se trabaja sin indicar unidades, todos los valores estarán en centímetros, kilogramos y segundos. Todos los materiales se considerarán lineales, elásticos e isotrópicos.

3.1.Simplificaciones

Para adaptar el modelo real al modelo de simulación se han realizado las oportunas simplificaciones (Oñate Ibáñez de Navarra, Eugenio. *Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos*) con objeto de reducir los tiempos de cálculo y optimizar la mejor geometría siendo fieles al modelo de partida a calcular. Se trabaja con un programa de elementos finitos, ANSYS, por lo que intentar representar en sumo detalle ciertas partes del modelo aumentan los tiempos de cálculo y problemas de geometría sin mejorar los resultados obtenidos, así para conseguir la mejor relación modelo/resultados se puede partir de consideraciones para los diferentes elementos de que se compone el modelo.

La superestructura está anclada al casco y cubierta del barco, al no ser el objetivo de este proyecto su cálculo, simplificando los puntos de unión por apoyos y limitaciones de desplazamiento correspondiendo a la situación en que se encontraría de estar instalado en el modelo real.

La gravedad para algunos elementos con los que se trabaja, como el backstay, que son muy esbeltos pueden producir deformaciones excesivas que se mirarán detenidamente para valorar su validez.

El cdg se dará en coordenadas respecto al arraigo del backstay en la perilla, como sólo calcula las masas de áreas y definir la jarcia como líneas, el cdg será muy similar a todos los cálculos ya que sólo se modifican los elementos de la jarcia de este último elemento.

3.1.1. Mástil

El perfil original del mástil es una extrusión de aluminio de 3 cm de grosor con una geometría curva de tipo aerodinámica para ofrecer una resistencia al viento reducida conjugando una alta resistencia. El palo se encuentra simplemente apoyado en cubierta o pasante y apoyado en la quilla, todo sujeto mediante los cables que más adelante se describirán. Las dimensiones del palo se muestran en la siguiente figura.

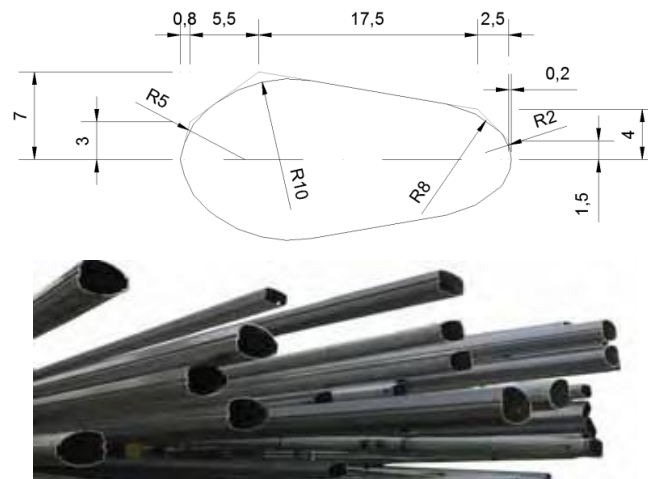


Figura 40: Geometría mástil³

La altura del mástil es de 1638cm, teniendo diversas secciones a lo largo del mismo correspondientes al puño de driza de la mayor, el anclaje de obenques altos y estay, los 3 pisos de crucetas y de los obenques intermedios, la unión con la botavara y el anclaje de la contra.

El raíl para los garruchos o gratil de la mayor se elimina por complejidad de geometría sin beneficios que justifiquen el exceso de cálculo.

La unión entre las crucetas y el mástil se realizará en el punto medio del mástil, así como los arraigos de los obenques. Se puede ver con más detalle en la *Figura 45: Plano superestructura*

Elemento

Para la creación del perfil emplearemos el elemento placa de Ansys, Shell63 de 4 nodos para modelos 3D, tabla 1.

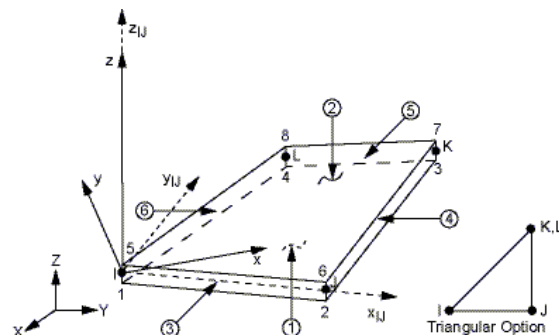


Figura 41: Shell63

³ Selden mast. Catálogo

Problemas modelo

A la hora de crear la geometría hay que tener especial cuidado con las formas curvas, en un principio se comenzó con la opción Spline de ANSYS, pero existen muchos errores en uniones y problemas de cálculo de manera que se optó por un diseño de líneas rectas y redondeos por el line fillet obteniendo la geometría de la *Figura 40*: Geometría mástil que es fiel al modelo real.

El mástil incorpora puntos unión con la botavara no pudiéndose modelar geométricamente al tratarse de una rótula con una serie de impedimentos que se subsanarán estableciendo correlaciones en el mallado, en el apartado de la botavara se verá más detalladamente estas restricciones.

Los anclajes de obenques y crucetas se simulan como puntos comunes a ambos elementos; la última simplificación que se ha considerado es eliminar los agujeros para las salidas de drizas y las uniones de las secciones del palo, analizados con detalle al final del documento. Se crea el perfil con 4 cuadrantes, teniendo puntos para unir en los laterales y en su parte posterior y anterior.

3.1.2. Crucetas

Para las crucetas existen tres perfiles diferentes en función de la altura a la que se encuentren, reduciéndose con ésta. Son las encargadas de mantener los obenques lo más perpendicular posible a la cubierta para mejorar la capacidad mecánica de la estructura. Estarán retrasadas un ángulo de 11° , aunque se intentará contrastar con otras inclinaciones.

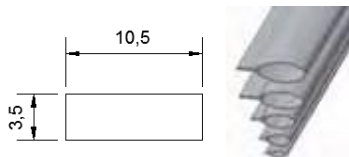


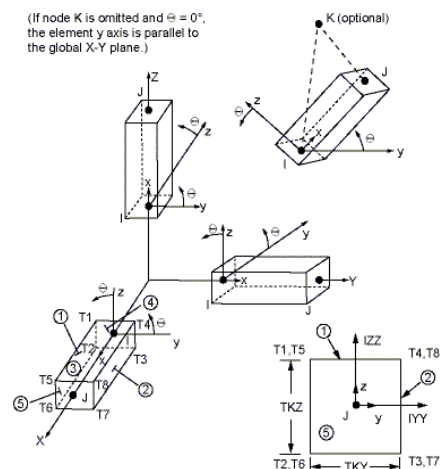
Figura 42: Crucetas

Son crucetas de aluminio cuadradas de igual sección todas ellas para simplificar el modelo.

Elemento

Tras probar varios elementos, la simplificación más efectiva y real ha sido optar por un elemento beam4⁴, de esta manera sólo necesitamos un punto de unión con el mástil que coincidirá con el del arraigo de los obenques.

Figura 43: Beam4



⁴ Roa Garzón, Máximo Alejandro y Garzón Alvarado, Diego Alexander. *Tutorial Ansys*. Universidad Nacional de Colombia. Capítulo 5

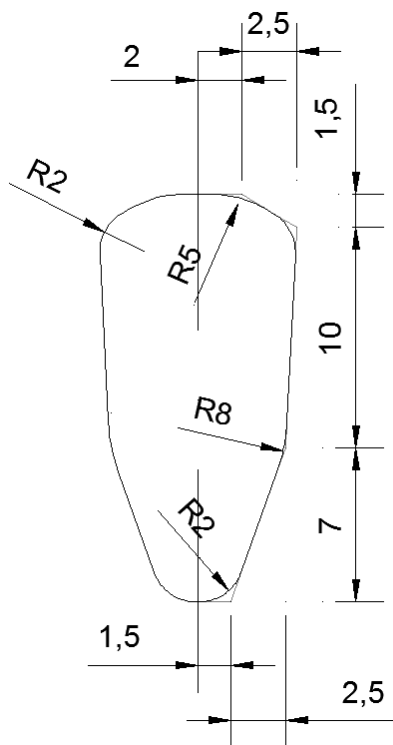
Problemas modelo

Con la opción beam se reduce la complejidad de precisar una línea de unión que sería necesaria para un elemento tipo placa, por tanto, introduciendo las medidas en las constantes reales para beam tenemos la geometría de las crucetas, así como sus características mecánicas (Beer, Johnston, Clausen. *Mecánica vectorial para ingenieros*. Séptima edición. Mc Graw Hill. 2004):

$$I_x = \frac{1}{12}bh^3 = 37.51cm^4 \quad I_y = \frac{1}{12}b^3h = 327.99cm^4 \quad I_T = \frac{1}{3}bh^3 = 150.06cm^4$$

3.1.3. Botavara

Tiene un perfil similar al del mástil, por lo que se ha seguido el mismo criterio en el diseño, la geometría se puede ver en la figura.



Elemento

Volviendo a emplear el elemento placa Shell 63.

Es del mismo material que el mástil, pero con un espesor menor

Problemas modelo

Como se introdujo en el apartado del mástil, la botavara tiene una unión con el palo en la que quedan libres las rotaciones laterales, pero están restringidos todos los desplazamientos y el resto de rotaciones a ser idénticos a los del mástil; la forma de solventar dicha peculiaridad ha sido establecer mediante el comando coupled uniones de los nodos del mallado introduciendo dichas restricciones.

Figura 44: Botavara

Igual que para el mástil, se emplea la creación de líneas y, posteriormente, los radios de acuerdo para asimilar el modelo al perfil real.

3.1.4. Velas

Los elementos encargados de captar el viento son el más complicado de simular debido a su forma, optando por un modelo de velas predeformadas con la geometría que suelen adoptar tras la carga de viento, en forma de perfil aerodinámico con empuje en dirección al avance, de manera que se pueda aplicar en su superficie una presión, obteniendo una componente que intente tumbar el modelo y otra que lo propulse hacia delante.

Las formas y medidas se pueden observar a continuación para cada una de las 3 de las que se hará el estudio. La génova y la mayor servirán para los vientos procedentes de ángulos entre 20 y 160° aproximadamente, para vientos portantes se empleará la mayor y el spi, con forma de globo para proporcionar el máximo empuje.

Elemento

Las velas son un tejido de Dacron, carbono o kevlar, pero se puede asemejar a un elemento placa adoptando las propiedades con cuidado, así, simulando con el shell93 o el Shell 181.

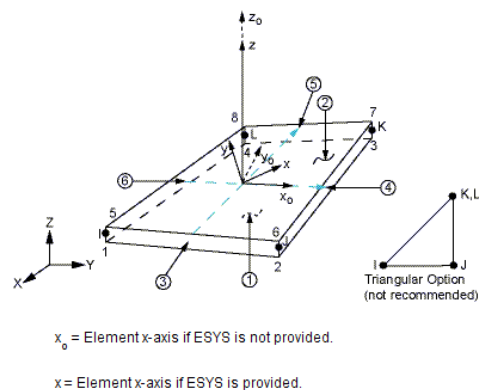


Figura 46: Shell181

Problemas modelo

Debido a ser un material “elástico” tipo tela existían varias opciones para escoger el elemento que lo representara; se trabajó con la Shell63, elemento del mástil y botavara, pero precisaba de más nodos para ajustarse más a la realidad (Linerio Segre, Dorian Luis. *Elasticidad plana mediante el MEF, empleando Ansys*. Universidad Nacional de Colombia).

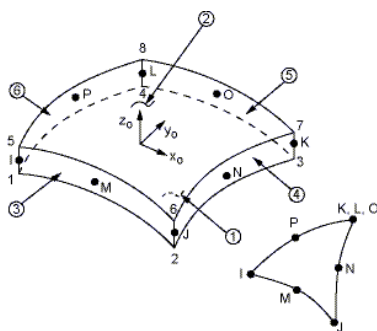


Figura 47: Shell281

Se encontró un modelo membrana Shell41 pero que el propio Ansys desaconseja, la otra opción era shell281 pero complicaba el cálculo; al final se acabó optando por un elemento intermedio que cumplía nuestras necesidades, el shell93 que es una ampliación del shell63.

El otro problema de modelar con elementos de tipo tela es que si se deforman demasiado no se transmiten cargas a la estructura que es lo que al fin y al cabo hay que estudiar, de manera que las propiedades mecánicas de las velas están un poco sobredimensionados para evitar su deformación

excesiva (ya las predeformamos para poder aplicar esta simplificación) y transmitir los esfuerzos a la estructura. Por otro lado, los tejidos de las velas no son rígidos, pero con Ansys no podemos simular algo que cargue pero que no tenga rigidez estructural, por lo que es similar a instalar una placa que ayuda a soportar las cargas de la estructura cuando esto en la realidad no es así.

Las velas relingadas (mayor y génova) están unidas por su gratil a la estructura, pero sin ser el mismo elemento para ambos, igual que se hizo con la botavara, tendremos que recurrir a la aplicación “coupled” para establecer las restricciones entre la mayor y el mástil y la génova con el estay permitiendo cualquier tipo de giro pero con desplazamientos horizontales en ‘x’ y ‘z’ comunes.

El spi no está relingado, es decir, está sujeto por una driza, una escota y una braza; el spi “vuela” sujeto por estos tres puntos, la driza está simplificada poniendo el punto de unión en el mástil, la escota será un apoyo que restrinja únicamente los desplazamientos permitiendo los giros y la braza está apoyada en el tangón (mástil horizontal que sirve para dar forma de balón a la vela) y simulando la braza como una fuerza horizontal que soporte los esfuerzos de la vela y así poder transmitir la fuerza de la vela al mástil mediante el tangón.



Figura 48: Velero navegando ceñida

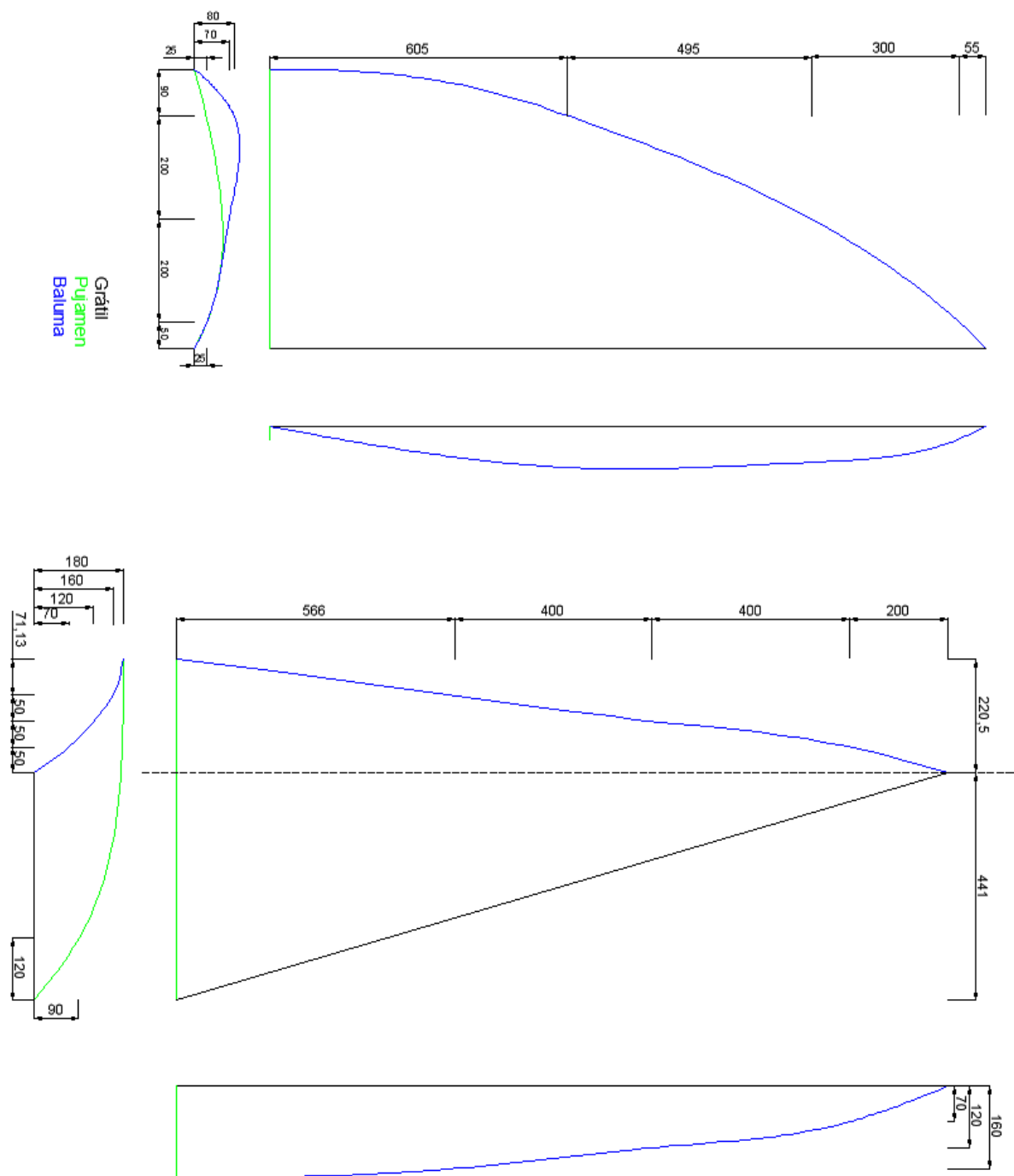


Figura 49: Mayor y génova

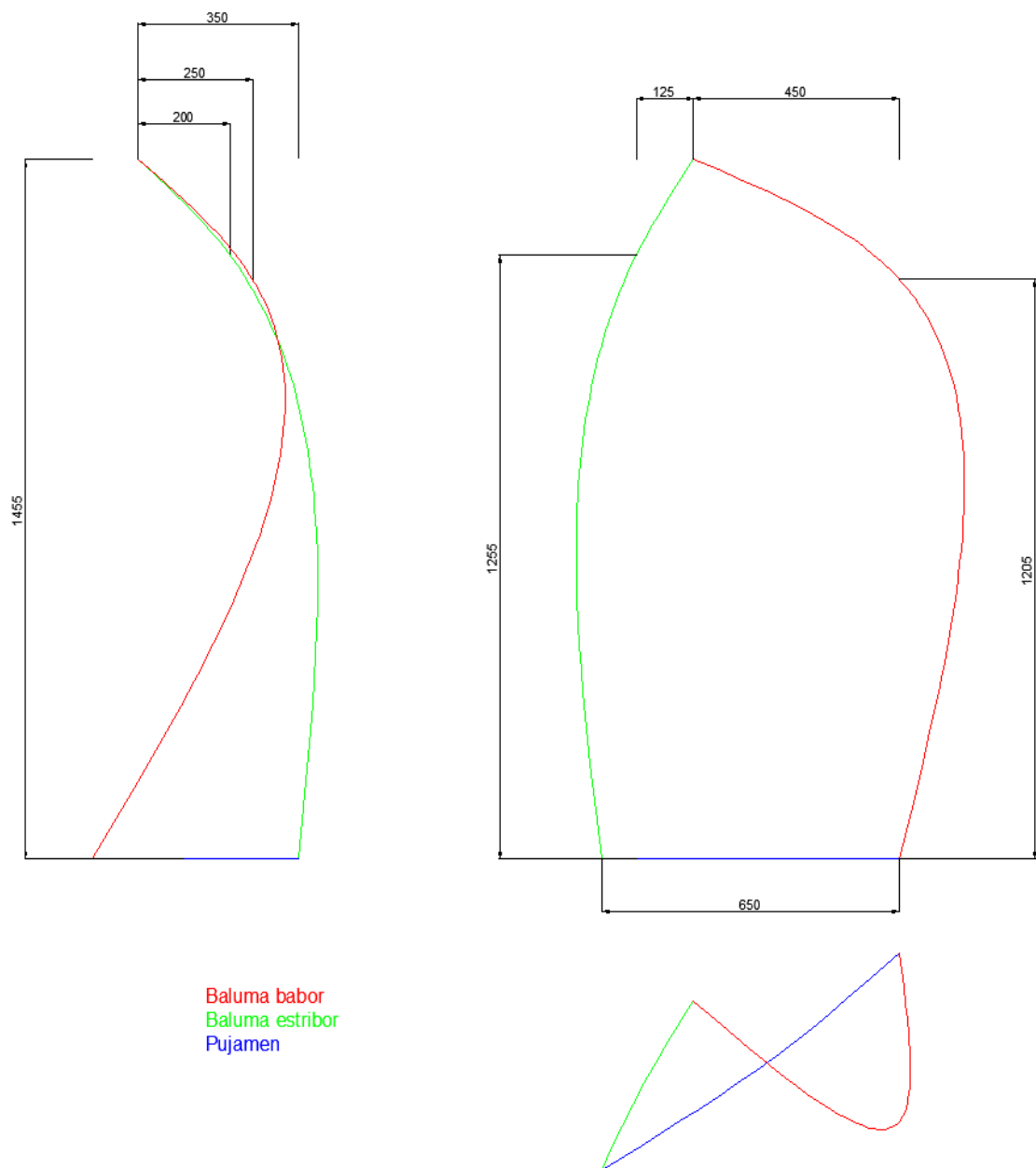


Figura 50: Spi



Figura 51: Velero con spi

3.1.5. Cabos

Los cabos que tiene el modelo son las escotas (sujetan las velas a la cubierta del barco) y las drizas (izan las velas y las sostienen).

Elemento

Se harán con la función beam con las propiedades que se indicarán en la tabla resumen.



Problemas modelo

Debido al sobredimensionamiento de las propiedades de las velas, los cabos soportarán una gran carga, por lo que, optando por valores suficientes, podrán aguantar la carga y no deformarse invalidando el resultado.

3.1.6. Cables

Son los encargados de soportar toda la estructura y las cargas del viento en las velas. Se verá la diferencia de cargar la estructura con los cables sin pretensar y con una pretensión en la estructura.



Se tienen dos cables para evitar el movimiento longitudinal como son el estay para evitar la caída hacia atrás y soportar el grátil del génova y el backstay para soportar el desplazamiento hacia delante.

Figura 52: Arraigo obenques

Lateralmente se mantiene la estabilidad gracias a los cables laterales conocidos como obenques, donde se distingue entre los altos (llegan hasta el arraigo superior del mástil) y los intermedios que dan sustento entre crucetas uniendo la base de una con la punta de la siguiente.

Las bases de estos elementos serían las encargadas de transmitir los esfuerzos a la estructura del casco, colocando en ellas los apoyos que lo simularán y se obtendrán las cargas que le son transmitidas.

Elemento

Los cables son de acero AISI 316 (Jarcia firme. Palau), para modelarlos se vuelve a emplear el elemento beam4 con las características que aparecen en la tabla resumen.

Problemas modelo

Con los cables ha existido cierta dificultad en su elección, en un principio se optó por la opción link10 de Ansys que es la empleada para cables, donde simular sólo la tensión dejando libre la compresión, pero a la hora del cálculo se obtienen deformaciones excesivas debido a las solicitaciones a los que se encuentran sometidos y a la geometría que presentan. Como en la realidad se puede optar por unos obenques, estay y backstay que son barras redondas (varillas) permitiendo la adopción de un elemento beam que se corresponda con este tipo de soportes, presenta así una jarcia continua.

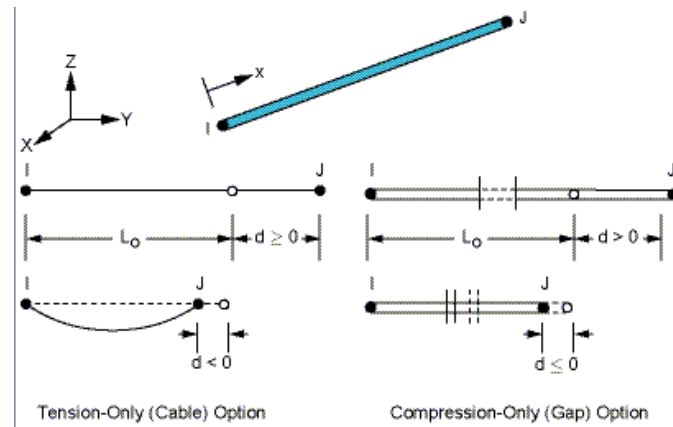


Figura 53: Link10

3.1.7. Tangón

El elemento encargado de transmitir los esfuerzos de la braza al palo es un elemento tubular de aluminio.

Elemento

Modelado mediante el elemento pipe16 con el que se obtiene un cilindro al que definiendo sus características como constantes reales, puede representarse gráficamente como una línea.

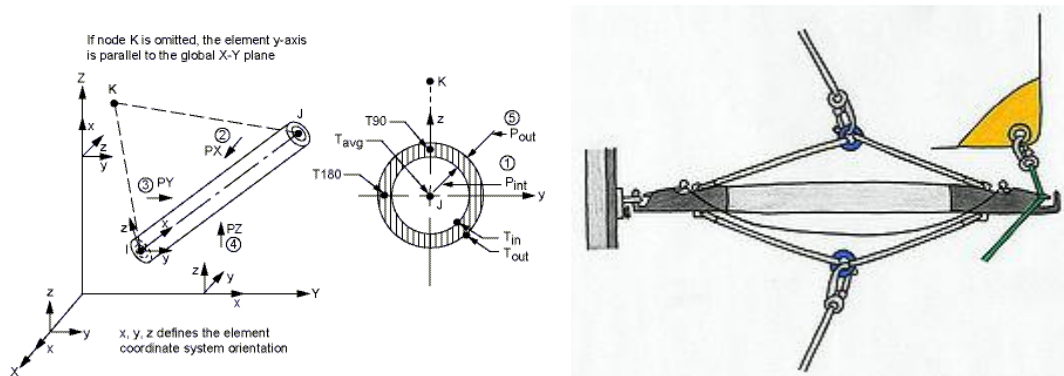


Figura 54: Pipe16 y tangón

3.2. Propiedades elementos

A lo largo de todo el proyecto se mantendrán constantes los materiales y sus propiedades pues no es nuestro objetivo la comparativa de las diversas alternativas. Las características de cada elemento se muestran en la *tabla 1*.

Para el cálculo en Ansys se empleará la disciplina simple de Structural y el h-Method por defecto. Los materiales serán lineales, elásticos e isotrópicos durante todo el análisis.

3.3. Carga

La carga (Beer, Johnston, Clausen. *Mecánica vectorial para ingenieros*. Séptima edición. Mc Graw Hill. 2004) a la que se somete el modelo es una carga de viento en principio estático, las condiciones dinámicas se simularían para estimar la fatiga de los elementos.

Partiendo de un viento de intensidad 25 nudos, a este nivel de viento ya se suele reducir trapo, pero se calculará así en unas condiciones más perjudiciales.

$$1nudo = 1.852 km/h; \quad \rho_{aire} = 0.0013 g/cm^3$$

$$\text{Presión dinámica } p = \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$p = \frac{1}{2} 0.0013 \frac{g}{cm^3} \cdot \left(25nudos \cdot 1.852 \frac{km/h}{nudo} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{1000m}{1km} \right)^2 \cdot \frac{100^3 cm^3}{1m^3} \cdot \frac{1kg}{1000g}$$

$$p = 107.51 kg \frac{m^2}{m^3 s^2} = 107.51 \frac{N}{m^2} \cdot \frac{1m^2}{(100)^2 cm^2}$$

$$p = 0.01075 \frac{N}{cm^2} = 1.075 \frac{kg \cdot cm}{s^2 \cdot cm^2}$$

La gravedad será de:

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2} = 981 \frac{cm}{s^2}$$

Elemento	Tipo elemento	Constantes reales										Material ⁵			
		Nº	Espesor (cm)	Preten	Área (cm ²)	Izz (cm ⁴)	Iyy (cm ⁴)	TKZ (cm)	TKY (cm)	IXX (cm ⁴)	φ (cm)	Nº	Módulo Elástico (kg cm/s ² cm ²)	Densidad (kg/cm ³)	Tipo
Mástil	Shell63	1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Crucetas	Beam4	3	-	-	36.7	328	37.51	3.5	10.5	150.1	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Botavara	Shell63	2	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Obenques altos	Beam4	11	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Obenques intermedios	Beam4	8	-	-	0.283	0.0108	0.0108	0.6	0.6	0.0432	6	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Estay	Beam4	7	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Backstay	Beam4	12	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Mayor	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2.3e11	0.00138	Carbono
Génova	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Spi	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Tangón	Pipe16	10	0.3	-	-	-	-	-	-	-	20	1	7e10	0.00267	Aluminio
Drizas y amantillos	Beam4	6	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Escotas	Beam4	8	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316

Tabla 1: Datos de partida

⁵ Estudio de la implantación de una unidad productiva dedicada a la fabricación de conjuntos soldados de aluminio. UPCommons. Goodfellow. Acero inoxidable AISI 316

4. Primera Fase: Obtención resultados base para vientos no portantes

4.1.Modelo 1: Simple

Es el modelo más simple, esta implementada la geometría de partida con las características de la tabla 1.

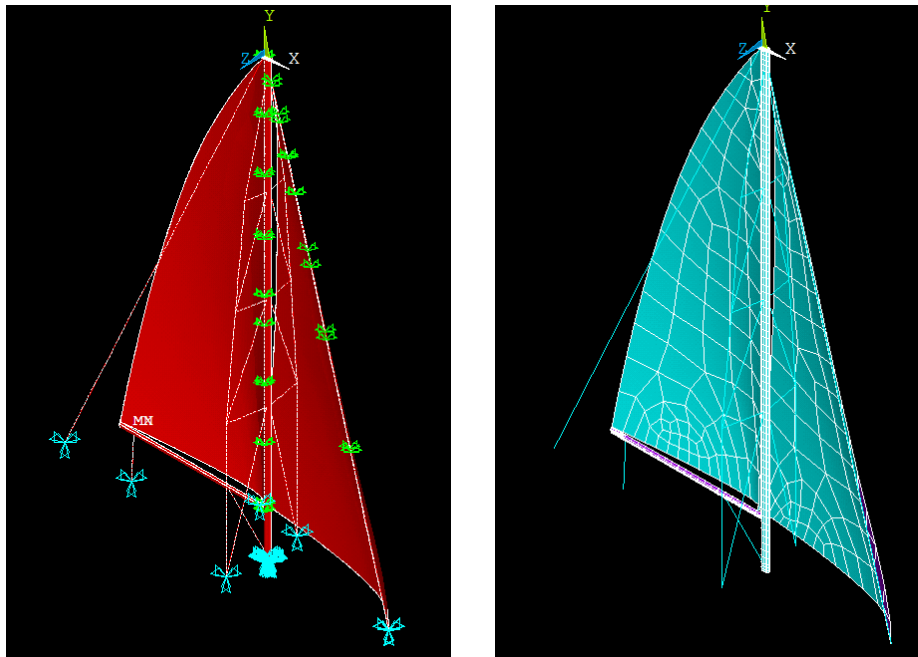


Figura 55: M1 descargado y mallado

Se pueden apreciar las restricciones de deslizamientos en los anclajes de obenques, estay y backstay con la “cubierta”, así como el apoyo del mástil sobre ella (restricciones azules) y las restricciones tipo coupled (Roa Garzón, Máximo Alejandro y Garzón Alvarado, Diego Alexander. *Tutorial Ansys*. Universidad Nacional de Colombia. Capítulo 8) entre mayor y palo y entre génova y estay (triangulación verde). El mallado es de tipo quad y mapeado para obtener mejores resultados.



Figura 56: Coz de un mástil apoyado en cubierta

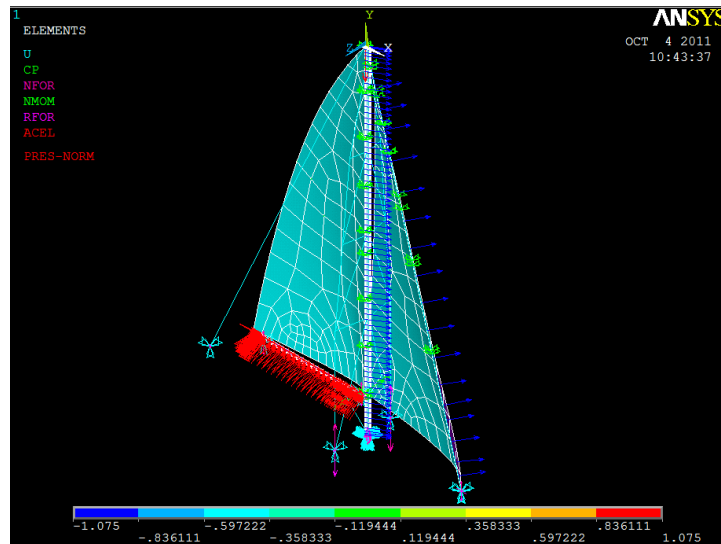


Figura 57: M1 distribución de presión

Resultados

A continuación se presentan los valores que buscados en el análisis.

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2151)	-10114	35090	-9,72E-02	36518,50347
Obenques medios y altos estribor (2446)	-54778	-2,99E+06	2,82E+05	3003358,035
Obenques medios y altos babor (2470)	72461	3,76E+06	3,73E+05	3780431,235
Backstay (2368)	1,06E+05	2,29E+05	0,35103	252118,3914
Escota génova (2176)	-6,60E+05	-1,34E+06	-51487	1490263,172
Escota mayor (2640)	14970	-1,30E+06	2,64E+05	1330450,564
Amura génova (1798)	6,29E+05	-1,10E+06	2,95E+05	1298518,772

Tabla 2: M1 Reacciones

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
0.23354	0.0864	1.12e7	2.11e7

Tabla 3: M1 Resultados

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.972	-995.34	-67.230
Esfuerzos en la base (kg)	-28776,2182	1,78E+05	4605,82818
Desplazamientos perilla (cm)	-5,58E-03	-2,26E-03	-2,12E-01

Tabla 4: M1 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla

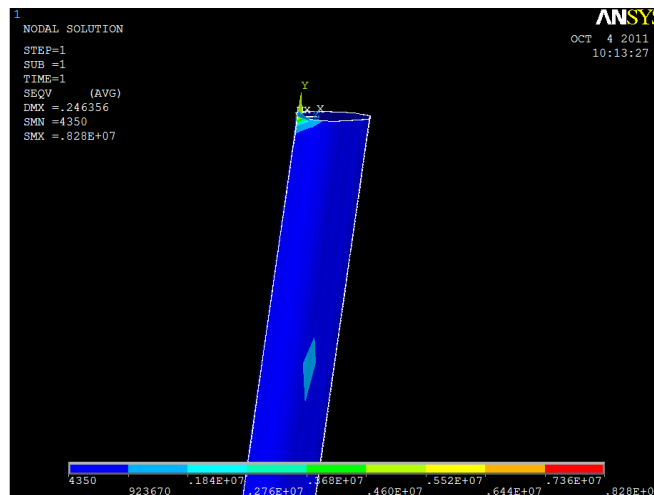
Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 2.1e11			
Backstay	-0.50122E+06	2ºf. ob. int. estr.	0.10757E+07
Estay	-76525	3ºf. ob. int. estr.	0.17660E+07
1ºf. ob. alt. estr.	0.37457E+07	1ºf. ob. int. bab.	-0.53338E+07
2ºf. ob. alt. estr.	0.31744E+07	2ºf. ob. int. bab.	-0.19497E+07
3ºf. ob. alt. estr.	0.22031E+07	3ºf. ob. int. bab.	-0.21848E+07
4ºf. ob. alt. estr.	0.22249E+07	1ºCruceta estr.	-6589.7
1ºf. ob. alt. bab.	-0.45754E+07	2ºCruceta estr.	-2598.2
2ºf. ob. alt. bab.	-0.35757E+07	3ºCruceta estr.	-3143.3
3ºf. ob. alt. bab.	-0.24016E+07	1ºCruceta bab.	9412.7
4ºf. ob. alt. bab.	-0.24457E+07	2ºCruceta bab.	3252.3
1ºf. ob. int. estr.	0.40337E+07	3ºCruceta bab.	3483.0

Tabla 5: M1 Esfuerzos axiales jarcia

Mástil

El mayor desplazamiento se encuentra en la perilla del mástil con una caída hacia estribor; las mayores tensiones se producen en los arraigos de los obenques altos y la máxima en el arraigo del backstay.

Figura 58: M1 tensión mástil



Botavara

Las mayores tensiones aparecen en la unión con el mástil y en el arraigo de la escota, la máxima se concentra en la salida del pajarín (cabo entre extremo de la botavara y la mayor)

Puntos Críticos

A la vista del modelo hay que solucionar puntos de concentración de tensiones como son los arraigos de los obenques altos y la perilla en el punto de sujeción del backstay.

Antes de analizar estos puntos de posible rotura, al no estar el modelo cargado como lo está en la realidad, se proseguirá con los diferentes modelos sin modificar geometrías; posteriormente, analizando en detalle cada modelo, se tomarán las medidas oportunas para subsanar las deficiencias o los posibles sitios de rotura.

4.2. Modelo 2: Refinado del mallado

Para comprobar la validez del mallado inicial se hace una comparativa con un refinado de la malla (Oñate Ibáñez de Navarra, Eugenio. *Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos: análisis elástico lineal*.1995), optando por una malla cuadrada de espacio 5, el cual es mucho más fino que el modelo 1.

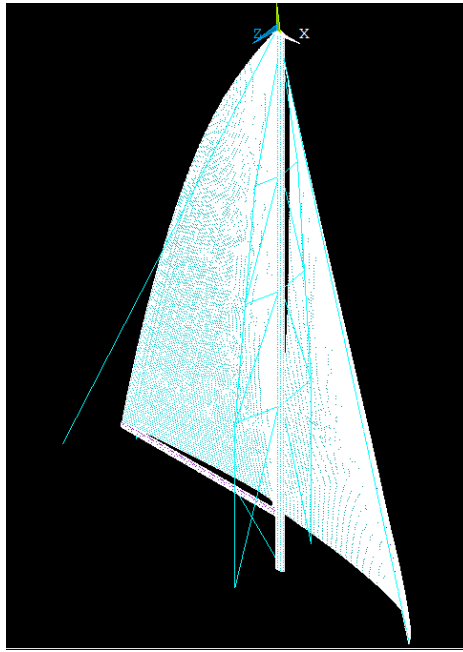


Figura 59: Remallado

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (54875)	28745	-1,02E+05	-26.500	109413,533
Obenques medios y altos estribor (54925)	-52973	-3,02E+06	2,73E+05	3028654,47
Obenques medios y altos babor (54944)	72350	3,76E+06	3,72E+05	3783655,31
Backstay (54844)	1,47E+05	3,18E+05	0,15544	350797,857
Escota génova (55054)	13811	-1,29E+06	2,64E+05	1314060,97
Escota mayor (55044)	14983	-1,31E+06	2,64E+05	1334267,47
Amura génova (25133)	4,81E+05	-8,19E+05	2,76E+05	989308,597

Tabla 6: M2 Reacciones

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
0.2366	0.108	6.53e6	2.44e7

Tabla 7: M2 Resultados

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.972	-995.34	-67.230
Desplazamientos perilla (cm)	-1,13E-02	-2,45E-02	-2,22E-01

Figura 60: M2 Cdg y desplazamiento perilla

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 2.1e11			
Backstay	-0.70898E+06	2ºf. ob. int. estr.	0.12021E+07
Estay	0.20848E+06	3ºf. ob. int. estr.	0.16649E+07
1ºf. ob. alt. estr.	0.38714E+07	1ºf. ob. int. bab.	-0.51488E+07
2ºf. ob. alt. estr.	0.32327E+07	2ºf. ob. int. bab.	-0.21922E+07
3ºf. ob. alt. estr.	0.23162E+07	3ºf. ob. int. bab.	-0.21978E+07
4ºf. ob. alt. estr.	0.23395E+07	1ºCruceta estr.	-6996.7
1ºf. ob. alt. bab.	-0.47413E+07	2ºCruceta estr.	-2448.5
2ºf. ob. alt. bab.	-0.36136E+07	3ºCruceta estr.	-3306.3
3ºf. ob. alt. bab.	-0.24326E+07	1ºCruceta bab.	10104
4ºf. ob. alt. bab.	-0.24747E+07	2ºCruceta bab.	3271.5
1ºf. ob. int. Estr.	0.39006E+07	3ºCruceta bab.	3524.1

Tabla 8: M2 Esfuerzos axiales jarcia

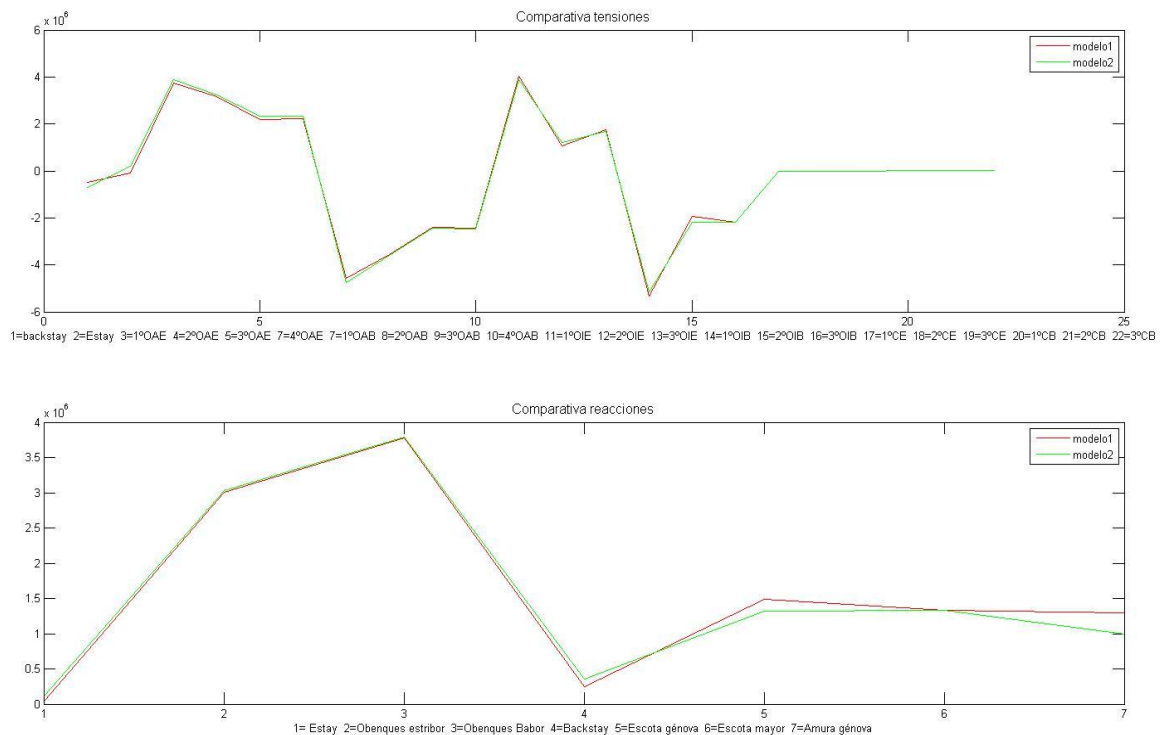


Figura 61: Comparativa M1 y M2

A la vista de los resultados, el mallado del modelo 1 es válido, arrojando valores muy próximos al del modelo 2 con una reducción notable del tiempo de cálculo.

4.3. Modelo 3: Pretensiones sin viento

Ahora, sometiendo al modelo a pretensiones, inicialmente se verán las tensiones sin carga de viento y posteriormente cargado.

De la experiencia se sabe que los palos suelen tener una precarga para que no tengan movimientos libres; al backstay puede dársele un desplazamiento de 15 cm con el tensor que lleva a su fin para poder dar curvatura al palo y mejorar el rendimiento de la mayor, así, también se tensa el estay, dando un mejor perfil de ataque al génova.

Para dar al modelo dichas pretensiones⁶ se opta por:

- Descenso en apoyos en la medida que se acorten los tensores
- Pretensiones en las constantes reales

Tensión backstay

Reduciendo 15cm se introduce una precarga de:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta l}{L} = \frac{15}{1801.96} = 0.0083$$

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz
Estay (2151)	0.21986E+08	-0.78066E+08	-2140.9
Obenques medios y altos estribor (2446)	0.22257E+07	0.17281E+09	-0.11453E+08
Obenques medios y altos babor (2470)	0.27740E+07	0.15847E+09	0.14275E+08
Backstay (2664)	-0.22632E+09	-0.49363E+09	95.997

Tabla 9: M3 Reacciones tensión backstay

Tensión estay

Al estay para dar mejor ángulo de ataque se le da una pretensión que suele oscilar entre 5 y 10cm y aumentar la flexión.

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta l}{L} = \frac{10}{1626.9} = 0.0061$$

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz
Estay (2151)	0.18154E+09	-0.64465E+09	-715.72
Obenques medios y altos estribor (2446)	0.22359E+07	0.17804E+09	-0.11506E+08
Obenques medios y altos babor (2470)	0.28870E+07	0.17378E+09	0.14856E+08
Backstay (2664)	-0.24764E+09	-0.54014E+09	96.755

Tabla 10: M3 Reacciones tensión estay

⁶ Todos los valores de pretensiones están tomados de la práctica en el trimado de mástiles de regata.

Obenques

Por último, para estabilizar los desplazamientos laterales y que al cargar la estructura no exista caída a sotavento perdiendo prestaciones se suelen

tensor la jarcia de los costados. $\Delta \varepsilon = \frac{\Delta l}{L} = \frac{5}{400} = 0.0125$

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz
Estay (2151)	0.17348E+09	-0.61602E+09	-101.76
Obenques medios y altos estribor (2446)	-0.26766E+08	-0.18342E+10	0.13773E+09
Obenques medios y altos babor (2470)	-0.25737E+08	-0.18413E+10	-0.13243E+09
Backstay (2664)	-0.12082E+09	-0.26352E+09	74.670

Tabla 11: M3 Reacciones tensión obenques

Conseguida una preflexión favorecida para los perfiles de la vela sin sobrepasar los límites de los materiales.

Por último, dando tensión a las drizas de las velas $\Delta \varepsilon = \frac{\Delta l}{L} = \frac{1}{12} = 0.083$

Con este modelo se puede ver las tensiones a las que se encuentra sometido el modelo aún ausente de carga de viento.

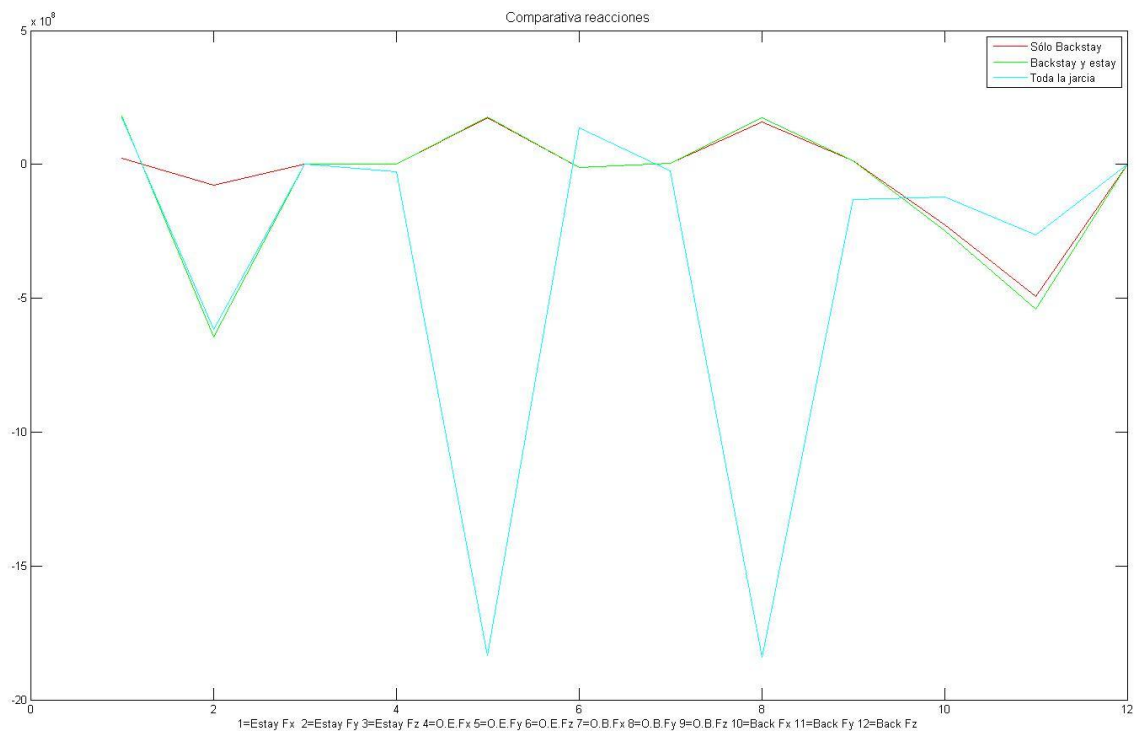


Figura 62: Comparativa evolución pretensiones

4.4.Modelo 4: Pretensión con viento

Cargando ahora la estructura con la presión del modelo 1.

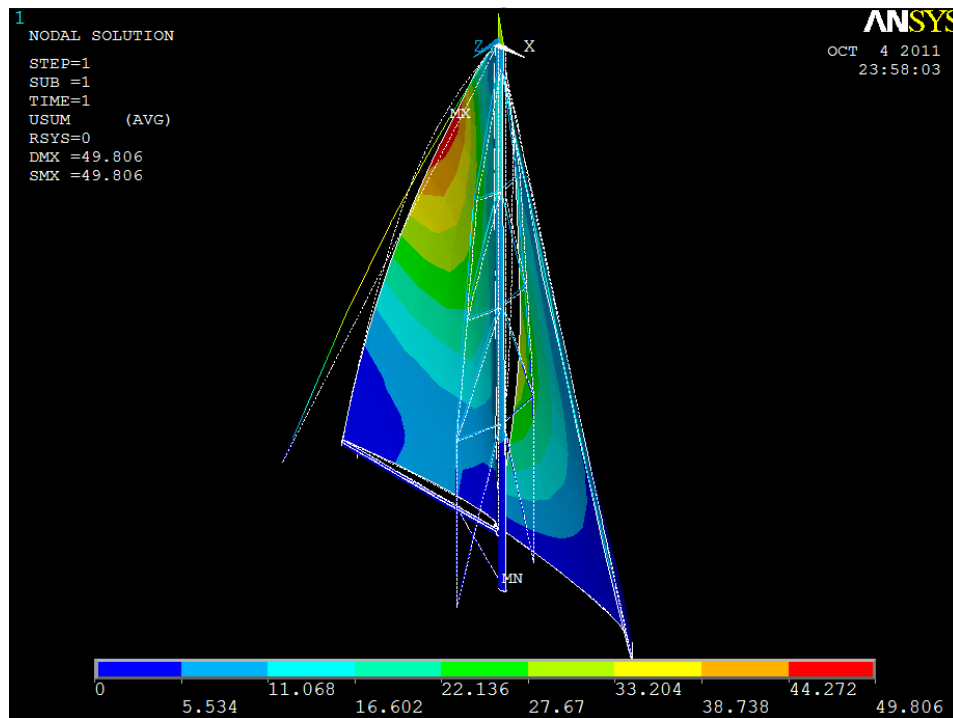


Figura 63: Pretensión con viento

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2151)	1,60E+08	-5,70E+08	-363,82	592035174
Obenques medios y altos estribor (2446)	-2,73E+07	-1,88E+09	1,41E+08	1887739253
Obenques medios y altos babor (2470)	-2,49E+07	-1,88E+09	-1,28E+08	1888230993
Backstay (2664)	-1,89E+08	-4,13E+08	43.901	454471434
Escota génova (2176)	-1,51E+06	7,36E+06	3,30E+05	7524348,25
Escota mayor (2640)	3,04E+06	-3,59E+06	1,64E+05	4708912,34
Amura génova (1798)	8,86E+07	-3,06E+08	9,56E+05	318447818

Tabla 12: M4 Reacciones

Este modelo es el más solicitado hasta el momento, en comparativa con su similar (modelo 1) las tensiones han aumentado considerablemente, donde más se puede observar es en la componente 'y' donde ha subido varios órdenes de magnitud debido a las pretensiones, pero estando todavía como mínimo un orden de magnitud por debajo del límite de elasticidad de los componentes. Se puede apreciar como las reacciones 'z' (componente torsor) también han aumentado aproximadamente 2 órdenes de magnitud.

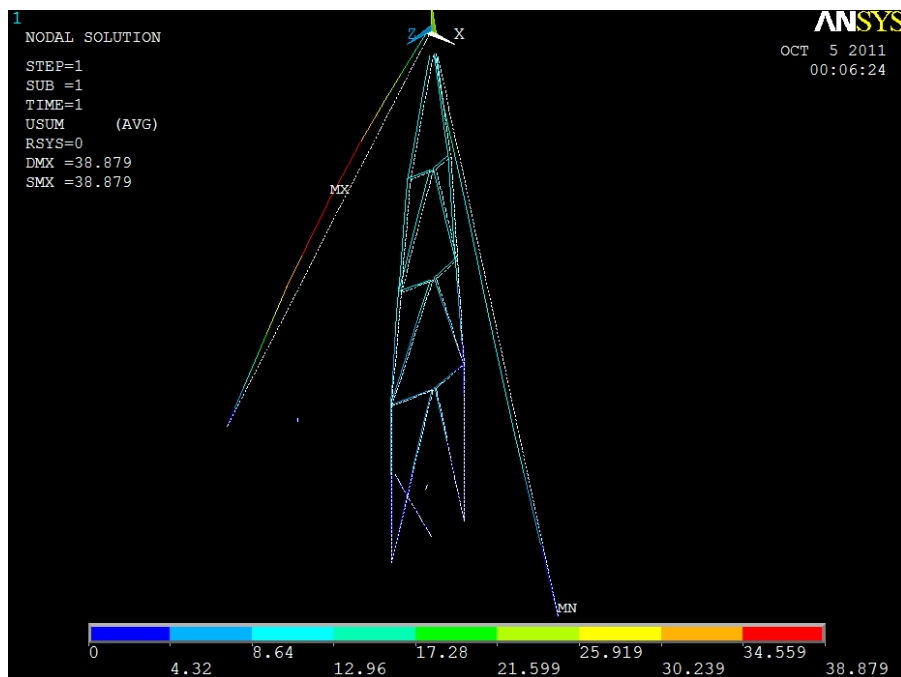


Figura 64: M4 Desplazamiento jarcia

Toda la estructura se ha desplazado hacia popa obteniendo una flexión cada vez más pronunciada conforme se aleja de la base obteniendo el alunamiento buscado en las velas.

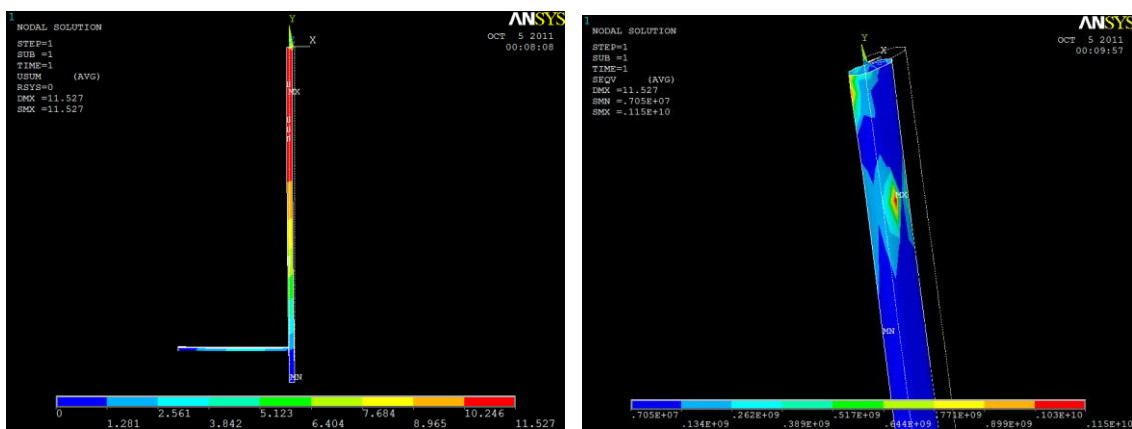


Figura 65: M4 Desplazamiento y tensión mástil

La rotación de la perilla por torsión es de 0.19609 desplazándose la popa del mástil hacia babor.

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
11.527	3.047	1.15e9	1.1e9

Tabla 13: M4 Resultados

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.972	-995.34	-67.230
Esfuerzos en la base (kg)	-4,50E+05	3,87E+08	-4,43E+05
Desplazamientos perilla (cm)	-9,54E+00	-3,55E+00	1,64E-02

Tabla 14: M4 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 2.1e11			
Backstay	0.90352E+09	2ºf. ob. int. estr.	0.85910E+09
Estay	0.11770E+10	3ºf. ob. int. estr.	0.10501E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.26471E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.18358E+10
2ºf. ob. alt. estr.	0.22022E+10	2ºf. ob. int. bab.	0.98768E+09
3ºf. ob. alt. estr.	0.16324E+10	3ºf. ob. int. bab.	0.11974E+10
4ºf. ob. alt. estr.	0.16562E+10	1ºCruceta estr.	-0.48771E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.27453E+10	2ºCruceta estr.	-0.15552E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.22327E+10	3ºCruceta estr.	-0.23506E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.15829E+10	1ºCruceta bab.	-0.52576E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.16059E+10	2ºCruceta bab.	-0.17733E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.20110E+10	3ºCruceta bab.	-0.22791E+07

Tabla 15: M4 Esfuerzos axiales jarcia

Elemento	Tipo elemento	Constantes reales										Material			
		Nº	Espesor (cm)	Preten	Área (cm ²)	Izz (cm ⁴)	Iyy (cm ⁴)	TKZ (cm)	TKY (cm)	IXX (cm ⁴)	φ (cm)	Nº	Módulo Elástico (kg cm/s ² cm ²)	Densidad (kg/cm ³)	Tipo
Mástil	Shell63	1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Crucetas	Beam4	3	-	-	36.7	328	37.51	3.5	10.5	150.1	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Botavara	Shell63	2	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Obenques altos	Beam4	11	-	0.0125	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Obenques intermedios	Beam4	8	-	0.0125	0.283	0.0108	0.0108	0.6	0.6	0.0432	6	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Estay	Beam4	7	-	0.0061	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Backstay	Beam4	12	-	0.0081	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Mayor	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2.3e11	0.00138	Carbono
Génova	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Spi	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Tangón	Pipe16	10	0.3	-	-	-	-	-	-	-	20	1	7e10	0.00267	Aluminio
Drizas y amantillos	Beam4	6	-	0.083	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Escotas	Beam4	8	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	AISI 316

Tabla 16: Características pretensión

Conclusiones

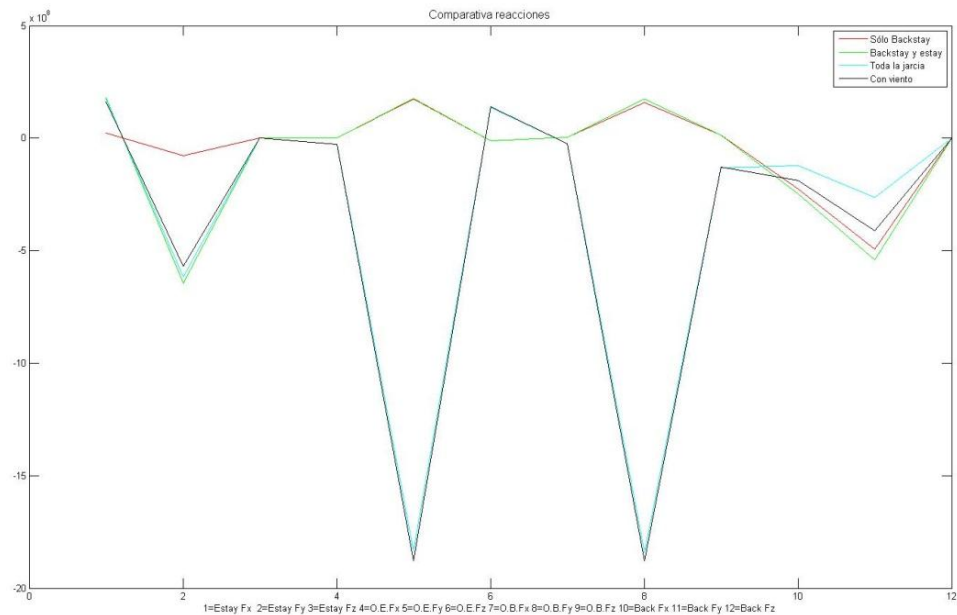


Figura 66: Comparativa pretensiones y pretensiones con viento

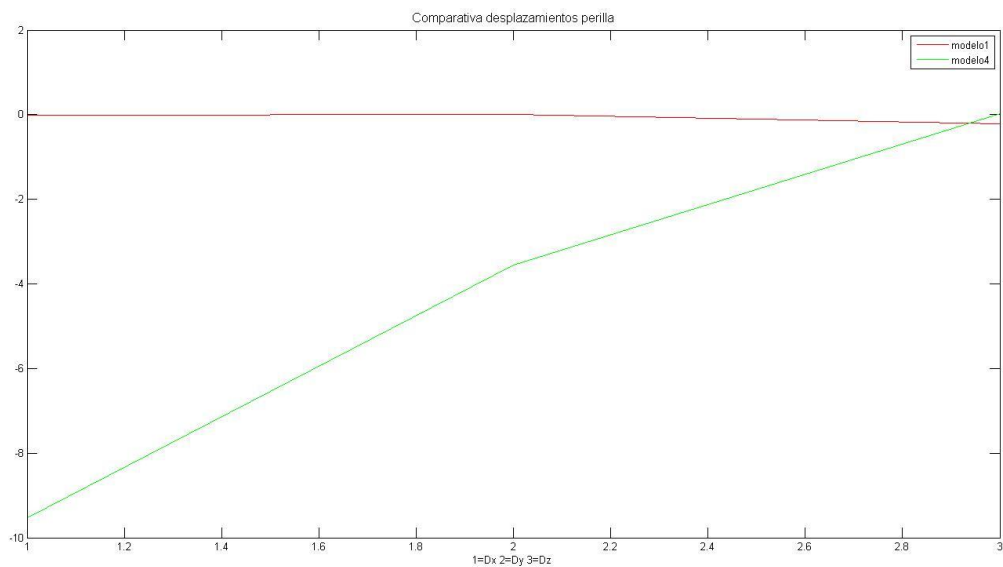


Figura 67: M1 y M4 desplazamientos

La carga de viento contribuye al aumento de las reacciones, relaja un poco la componente vertical del estay al crear cierta sustentación pero, por el contrario, aumenta la del backstay en horizontal y vertical por el empuje hacia delante de la estructura, lo cual indica que existe propulsión. Con la pretensión desplazamos la perilla hacia popa y reducimos el desplazamiento lateral a valores casi nulos.

4.5. Modelo 5: Drizas y cabos interior elementos.

Para mantener las velas izadas se necesitan las drizas, éstas se mantienen bajo una tensión por dentro del palo y podría influir en la distribución de tensiones. En la botavara también existen tensiones por el pajarín. Modelando a continuación 2 drizas en el mástil y el pajarín en la botavara.

Partiendo de un módulo elástico de 30Gpa, si se le introduce una tensión que haga que el cabo se deforme 5cm la fuerza que a aplicar es de:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{F}{A} \quad F = E \cdot A \cdot \varepsilon$$

$$F = 30e9 \frac{N}{m^2} \cdot \frac{1m^2}{(100cm)^2} \cdot \pi \frac{1^2}{4} cm^2 \cdot \frac{5}{1663} = 7084.17N = 708417 \frac{kg \cdot cm}{s^2}$$

$$\text{O bien un acortamiento de } \varepsilon = \frac{5}{1663} = 0.003$$

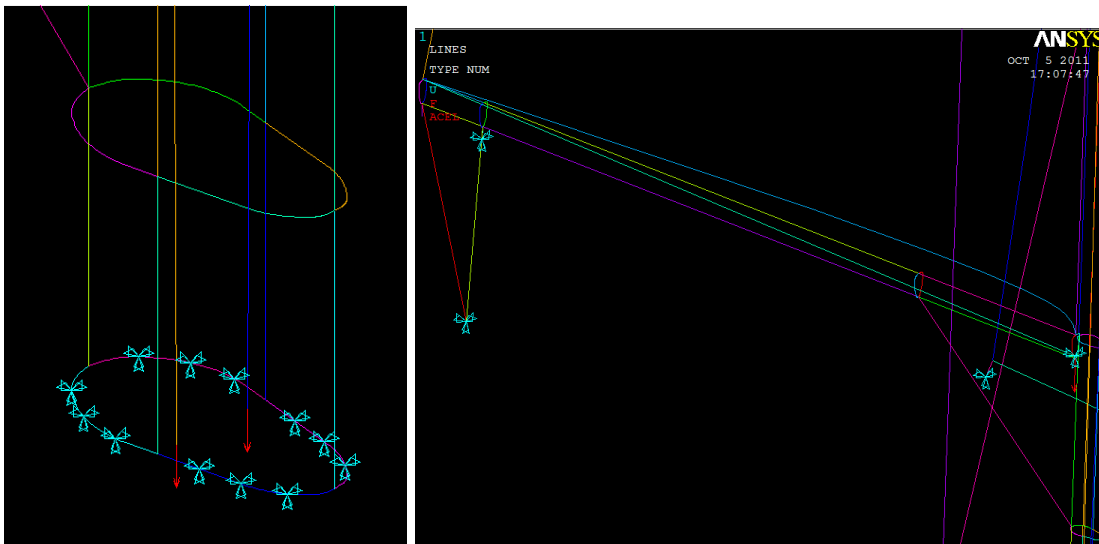
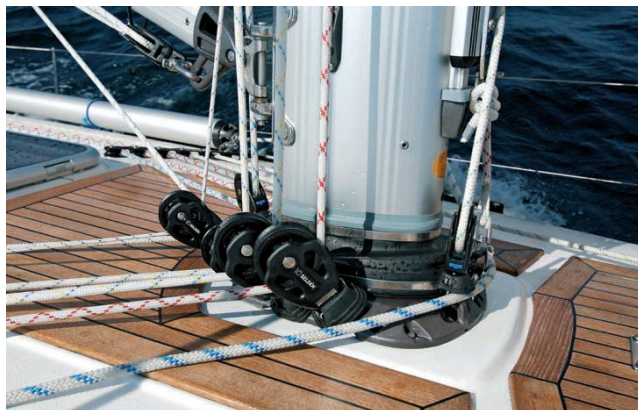


Figura 68: Detalle de drizas en la cox y pajarín en la botavara



Para el pajarín de la botavara

$$F = 30e9 \frac{N}{m^2} \cdot \frac{1m^2}{(100cm)^2} \cdot \pi \frac{1^2}{4} cm^2 \cdot \frac{2}{540} = 872665 \frac{kg \cdot cm}{s^2} \quad \text{ó} \quad \varepsilon = \frac{2}{540} = 0.0037$$

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2151)	1,55E+08	-5,50E+08	-446,48	571257857,2
Obenques medios y altos estribor (2446)	-2,67E+07	-1,83E+09	1,37E+08	1833049518
Obenques medios y altos babor (2470)	-2,56E+07	-1,83E+09	-1,32E+08	1832136871
Backstay (2664)	-1,36E+08	-2,97E+08	70.854	326477384,9
Escota génova (2176)	-1,09E+06	5,76E+06	3,01E+05	5871375,333
Escota mayor (2640)	1,24E+06	3,29E+06	2,89E+04	3517192,731
Amura génova (1798)	3,84E+07	-1,30E+08	7,61E+05	135427709

Tabla 17: M5 Reacciones

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
13.287	3.852	2.31e9	5.63e8

Tabla 18: M5 Resultados

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.972	-995.34	-67.230
Esfuerzos en la base (kg)	-4,38E+05	3,90E+08	-3,34E+05
Desplazamientos perilla (cm)	-1,12E+01	-4,26E+00	7,85E-01

Tabla 19: M5 Cdg, reacciones en la cox y desplazamiento perilla

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 2.1e11			
Backstay	0.64907E+09	2ºf. ob. int. estr.	0.90897E+09
Estay	0.11357E+10	3ºf. ob. int. estr.	0.11078E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.25636E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.18875E+10
2ºf. ob. alt. estr.	0.20919E+10	2ºf. ob. int. bab.	0.94039E+09
3ºf. ob. alt. estr.	0.14908E+10	3ºf. ob. int. bab.	0.10835E+10
4ºf. ob. alt. estr.	0.15125E+10	1ºCruceta estr.	-0.48820E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.26048E+10	2ºCruceta estr.	-0.16406E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.21167E+10	3ºCruceta estr.	-0.21465E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.15287E+10	1ºCruceta bab.	-0.49952E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.15510E+10	2ºCruceta bab.	-0.16046E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.19652E+10	3ºCruceta bab.	-0.22013E+07

Tabla 20: M5 Esfuerzos axiales jarcia

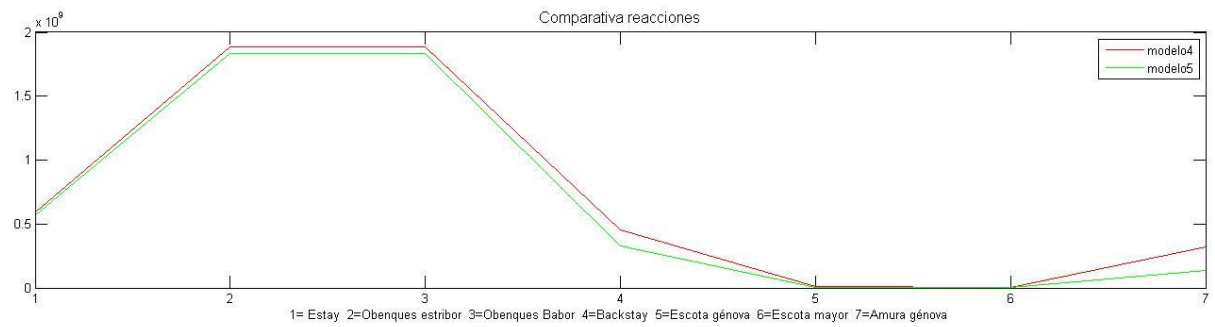
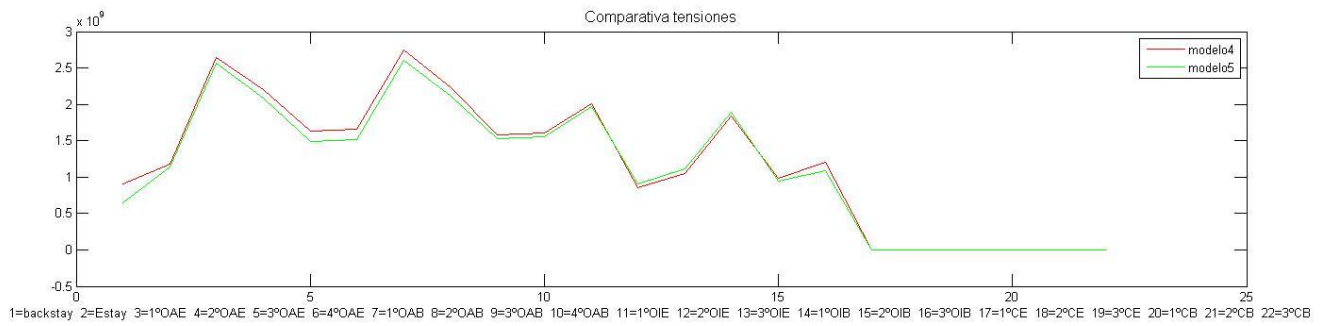


Figura 70: M4 y M5 reacciones y tensiones

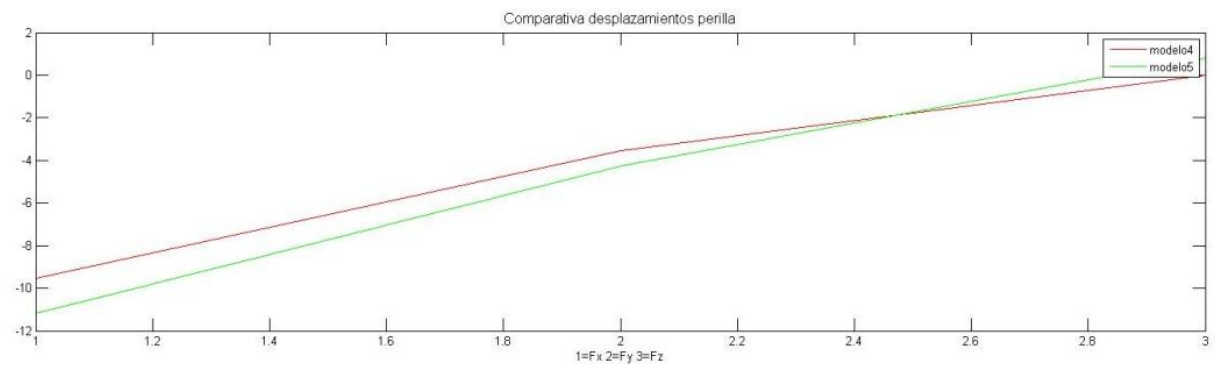
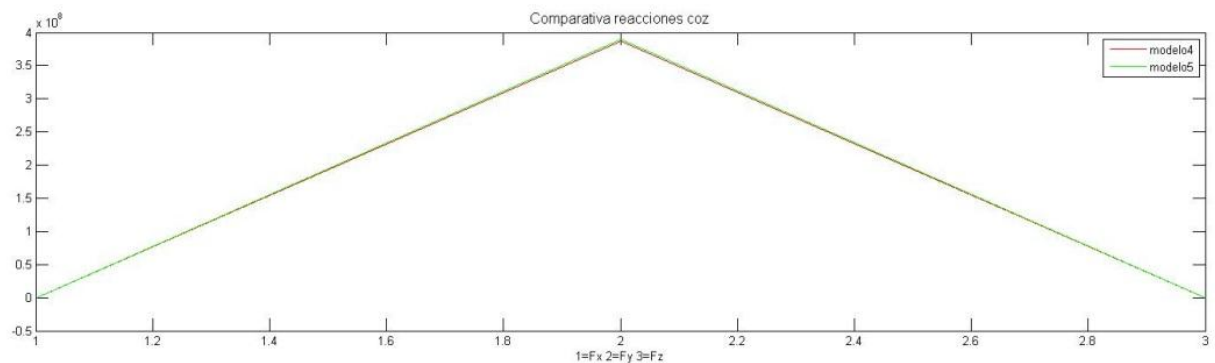


Figura 69: M4 y M5 desplazamientos y coz

Elemento	Tipo elemento	Constantes reales										Material			
		Nº	Espesor (cm)	Preten	Área (cm ²)	Izz (cm ⁴)	Iyy (cm ⁴)	TKZ (cm)	TKY (cm)	IXX (cm ⁴)	φ (cm)	Nº	Módulo Elástico (kg cm/s ² cm ²)	Densidad (kg/cm ³)	Tipo
Mástil	Shell63	1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Crucetas	Beam4	3	-	-	36.7	328	37.51	3.5	10.5	150.1	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Botavara	Shell63	2	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Obenques altos	Beam4	11	-	0.0125	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Obenques intermedios	Beam4	8	-	0.0125	0.283	0.0108	0.0108	0.6	0.6	0.0432	6	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Estay	Beam4	7	-	0.0061	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Backstay	Beam4	12	-	0.0081	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Mayor	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2.3e11	0.00138	Carbono
Génova	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Spi	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Tangón	Pipe16	10	0.3	-	-	-	-	-	-	-	20	1	7e10	0.00267	Aluminio
Drizas y amantillos	Beam4	6	-	0.083	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Escotas	Beam4	8	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	AISI 316
Drizas	Beam4	13	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Pajarín	Beam4	14	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316

Figura 71: M5 Características con drizas

4.6.Conclusiones

Con el modelo 5 se ha completado toda la geometría básica y las cargas a las que un mástil real se encuentra sometido.

Analizando en detalle el modelo se observa la gran diferencia de tensiones y reacciones entre los modelos sin precarga y con precarga.

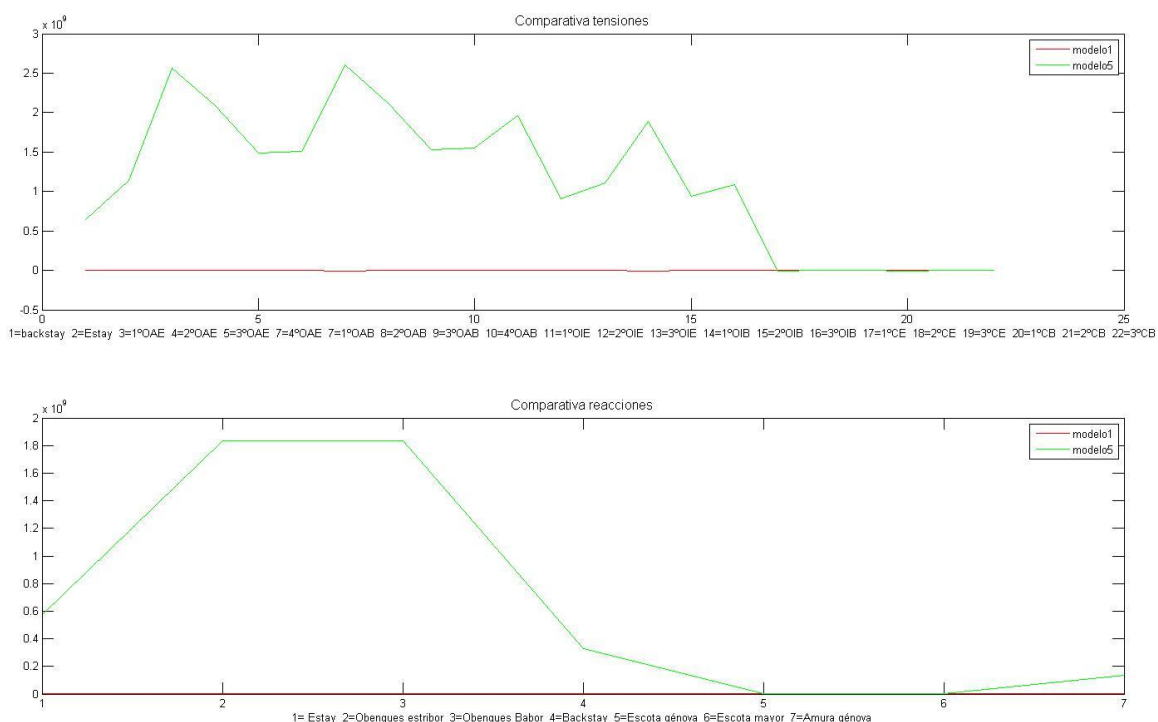


Figura 72: M1 y M5

4.6.1. Obenques

Al someter la estructura a carga de viento sin pretensión (modelos 1 y 2) vemos como los obenques de sotavento quedan sometidos a compresión por el desplazamiento del palo a babor; la compresión en estos elementos no es considerada para soportar cargas. Esta tensión desaparece al someter a los cables a pretensión, quedando a tracción en todas las aplicaciones.

Las mayores tensiones en la jarcia se encuentran en los obenques altos, más concretamente en la primera fase desde el arraigo con la cubierta hasta la primera cruceta; no es una carga excesiva pues todavía se tiene de respeto más de un orden de magnitud de esfuerzo.

4.6.2. Mástil

Con la pretensión se consigue desplazar la perilla hacia popa, pero lo buscado es una forma curva en el mástil, no una caída general desde la coza; habrá que solucionar este aspecto empleando crucetas rectas o con la ayuda de un Babystay o burdas.

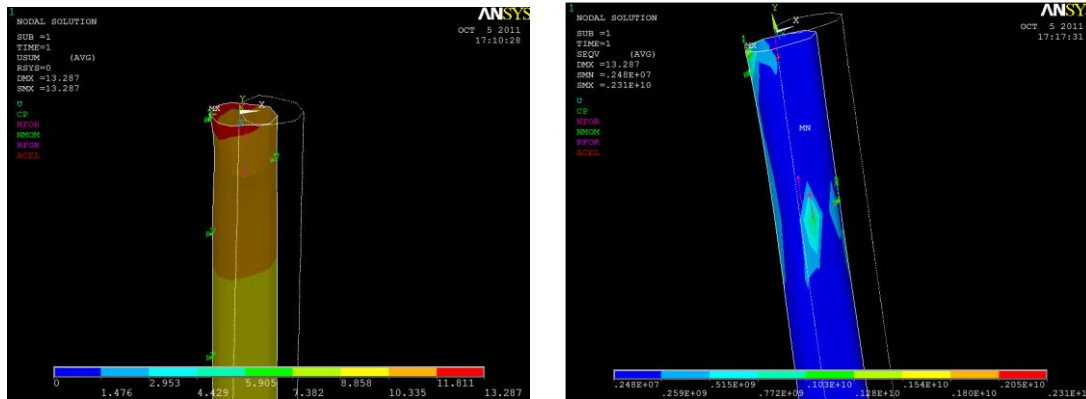


Figura 73: Desplazamiento y tensiones perilla

Se puede observar también que el perfil de la perilla se deforma, produciéndose un vértice en el arraigo del backstay que hay que reparar, para ello se puede colocar un perfil en la perilla a modo de tapa que ayude a mantener la geometría y reducir las tensiones concentradas.

Los arraigos de los obenques altos son un punto de alta concentración de tensiones, una posible solución a adoptar es la instalación de varillas que unan las dos salidas y que sea capaz de pretensarse; también para el estay y el backstay se podrían adoptar estas medidas para solventar los picos de tensión. A pesar de la concentración que se observa, el material es capaz de soportarlas y las medidas citadas podrían no ser necesarias, aunque habrá que estudiar si reduciendo perfil se podría seguir montando el modelo.

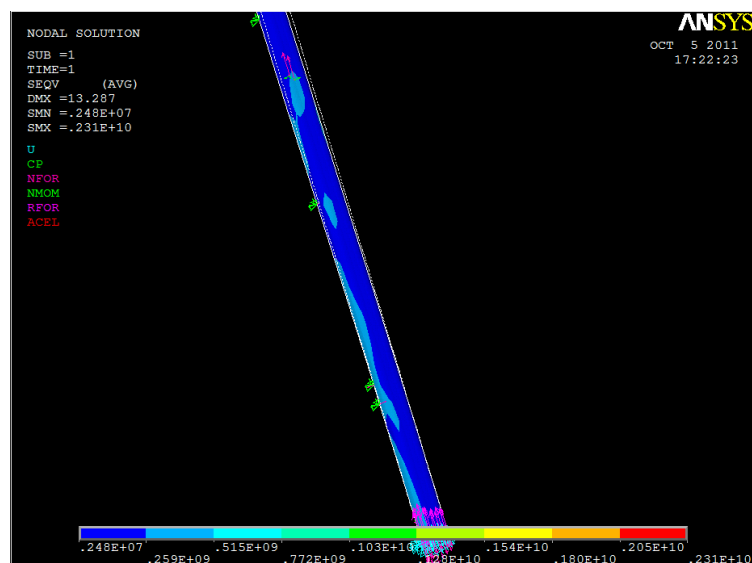


Figura 74: Tensiones primera cruceta

El apoyo de la primera cruceta y, por tanto, de la primera fase de obenques intermedios, también está bastante solicitado, pero sin suponer ningún peligro para el perfil.

4.6.3. Botavara

La botavara tiene 4 puntos a considerar como son: pajarín, unión con el mástil, escota y contra.

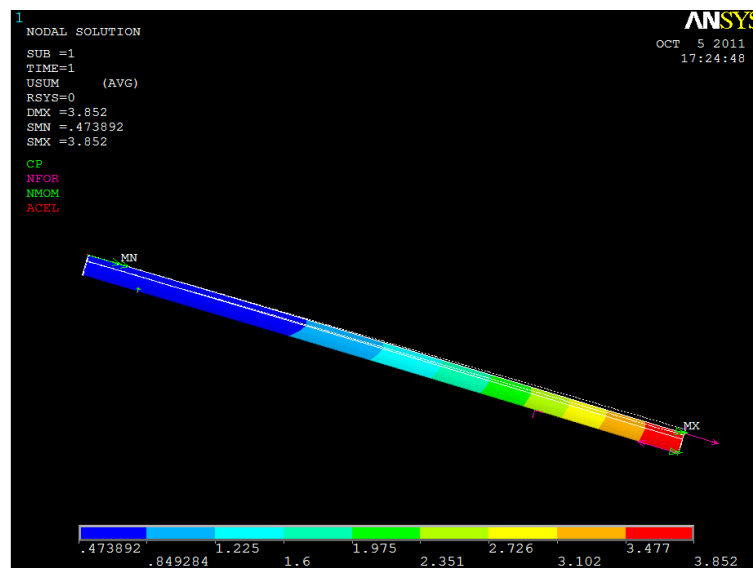


Figura 75: Desplazamientos botavara

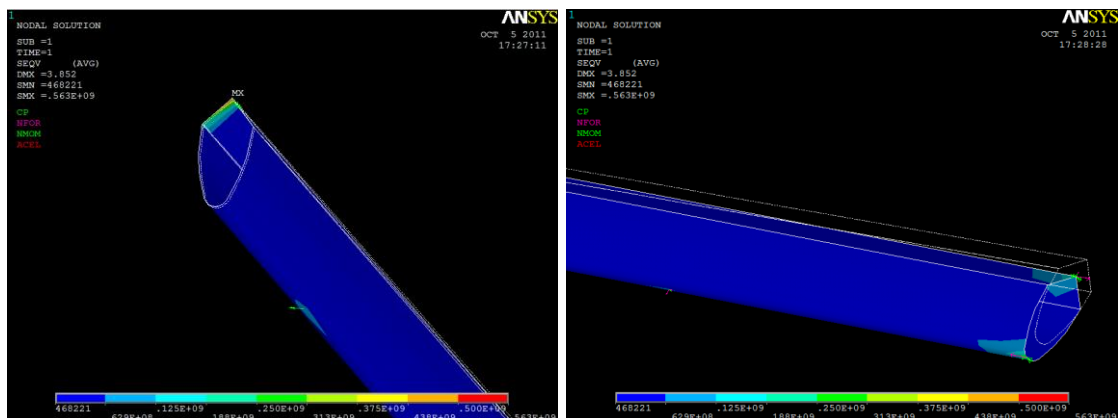


Figura 76: Tensiones pajarín y escota (izq.) y contra y unión (dcha.)

4.6.4. Coz y perilla

Las reacciones en la coz son de compresión debido a que toda la estructura carga hacia abajo por su propio peso y se incrementa notablemente con la pretensión que atrae el mástil hacia abajo.

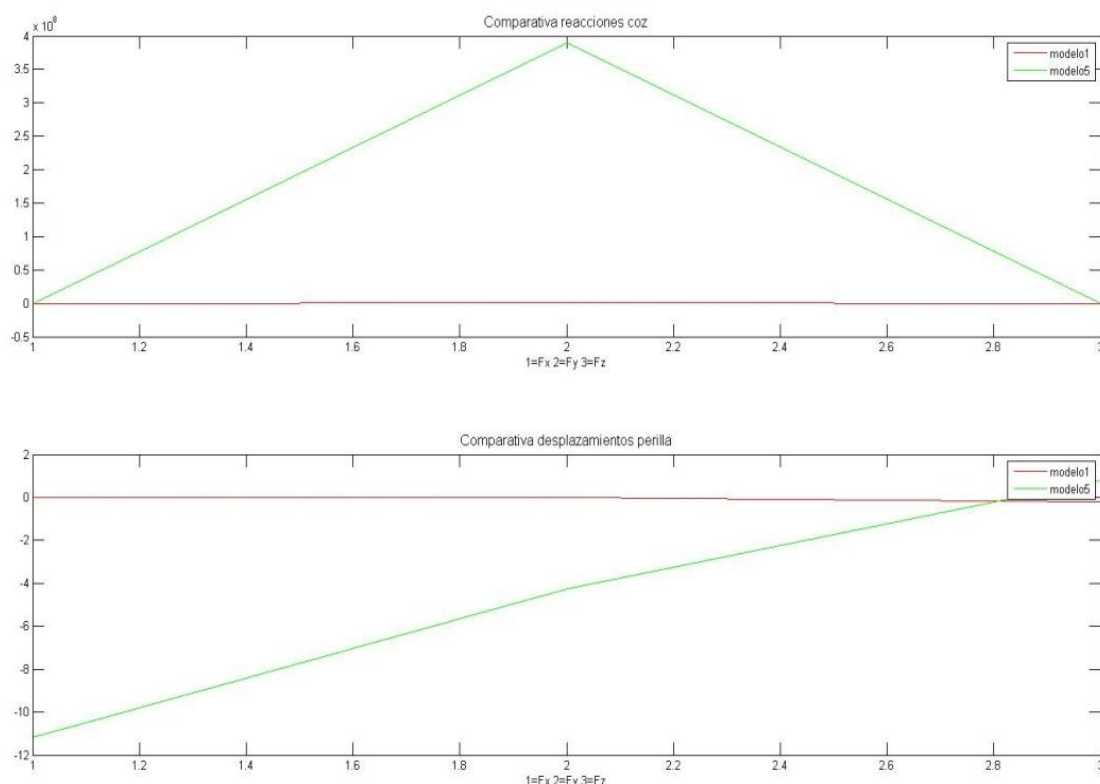


Figura 77: M1 y M5 reacciones coz y desplazamientos perilla

La perilla, vista anteriormente, se ha conseguido desplazar, pero no en la forma querida. El desplazamiento es hacia popa y descendente, consiguiendo un menor desplazamiento lateral que era lo buscado.

4.6.5. Crucetas

Observando los modelos 1 y 2, donde no hay pretensión, las crucetas del lado de sotavento se encuentran sometidas a tracción mientras que las de barlovento a compresión por el efecto de tracción de sus obenques; esta situación desaparece ya con el modelo 3 cuando la jarcia es pretensada, quedando todas a compresión. Se comprobará también la distribución y variación de tensiones y deformaciones con el empleo de crucetas rectas y la forma que adopta el perfil del palo con crucetas de violín.

5. Segunda fase: modificaciones del modelo

En esta segunda fase del proyecto se parte del último modelo de la fase anterior; aplicando ahora las modificaciones introducidas para buscar la mejora del modelo.

5.1.Modelo 6: Perilla y botavara

En este modelo simplemente se comprobará el efecto de cerrar los perfiles del mástil y la botavara.

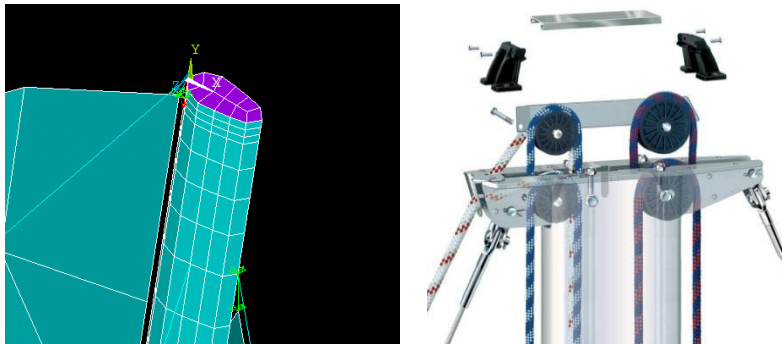


Figura 78: Mallado perilla

Con la simple placa de la perilla se consigue reducir las deformaciones de la baluma de la vela que ahora es casi 9cm menor respecto al modelo anterior.

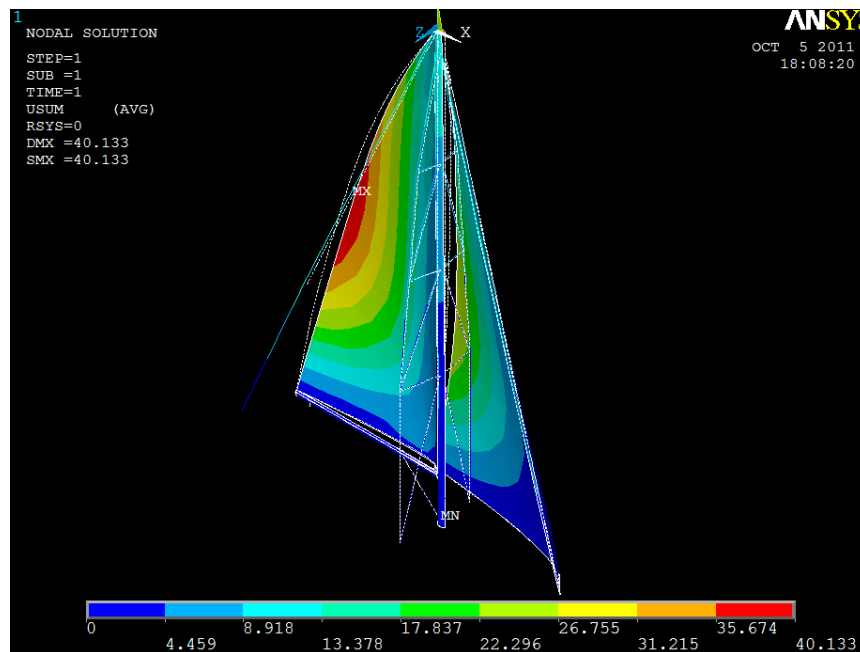


Figura 79: M6 desplazamientos

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2151)	1,55E+08	5,52E+08	-498,65	573417201,9
Obenques medios y altos estribor (2446)	-2,75E+07	-1,83E+09	1,41E+08	1836261753
Obenques medios y altos babor (2470)	-2,55E+07	-1,83E+09	-1,31E+08	1833493616
Backstay (2664)	-1,46E+08	-3,19E+08	87.804	350940700,7
Escota génova (2176)	-1,13E+06	5,87E+06	3,01E+05	5986505,81
Escota mayor (2640)	-2,56E+06	-1,55E+06	78222	2992018,331
Amura génova (1798)	4,35E+07	4,35E+07	7,78E+05	61565630,05

Tabla 21: M6 Reacciones

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²)< 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
12.448	3.884	1.11e9	6.3e8

Tabla 22: M6 Resultados

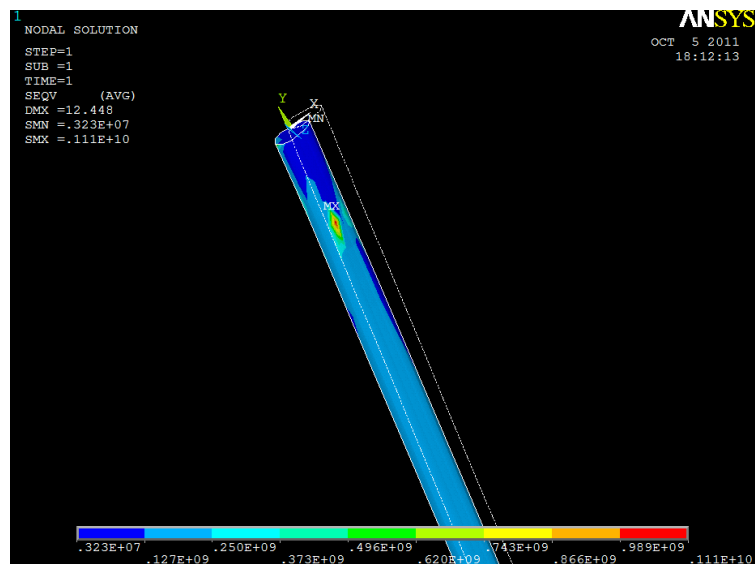


Figura 80: M6 tensiones perilla

La perilla ahora no tiene deformación en forma de vértice y las tensiones en la perilla han disminuido; éstas se han concentrado en el arraigo de los obenques altos pero de menor intensidad.

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.884	-996.24	-69.053

Tabla 23: M6 Cdg

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) <2.1e11			
Backstay	0.69769E+09	2ºf. ob. int. estr.	0.90059E+09
Estay	0.11400E+10	3ºf. ob. int. estr.	0.10916E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.25376E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.18800E+10
2ºf. ob. alt. estr.	0.20703E+10	2ºf. ob. int. bab.	0.94120E+09
3ºf. ob. alt. estr.	0.14779E+10	3ºf. ob. int. bab.	0.10915E+10
4ºf. ob. alt. estr.	0.14994E+10	1ºCruceta estr.	-0.48342E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.26117E+10	2ºCruceta estr.	-0.16167E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.21232E+10	3ºCruceta estr.	-0.21280E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.15309E+10	1ºCruceta bab.	-0.50050E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.15532E+10	2ºCruceta bab.	-0.16165E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.20234E+10	3ºCruceta bab.	-0.22044E+07

Tabla 24: M6 Esfuerzos axiales jarcia

Conclusiones

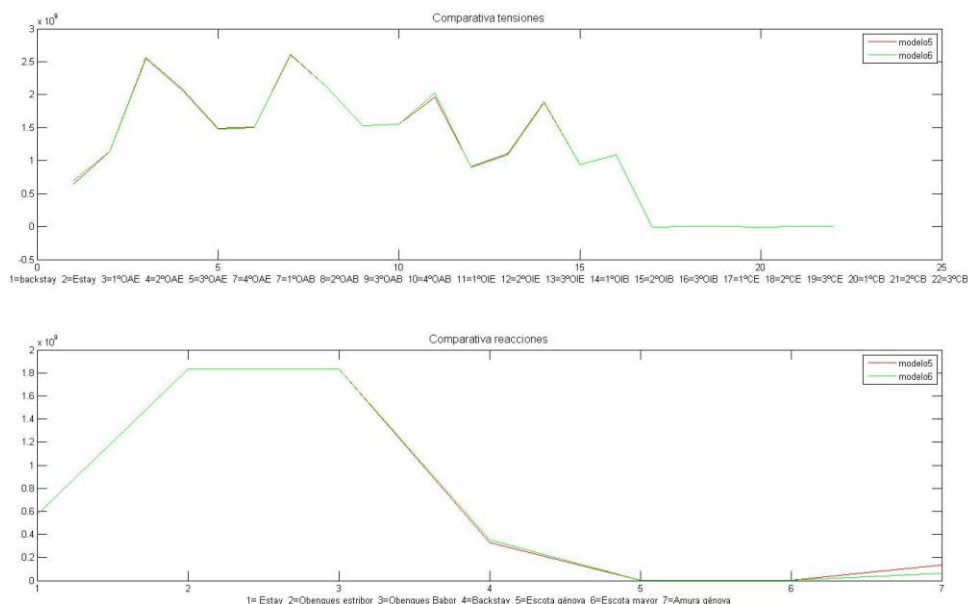


Figura 81: Comparativa M5 y M6

En el gráfico se observa que las tensiones y las reacciones son prácticamente iguales, consiguiendo reducir la deformación de la perilla, por tanto, la incorporación de la perilla es válida. Éste será nuestro nuevo modelo.

5.2.Modelo 7: Crucetas rectas

Modificando ahora la geometría de los obenques y de las crucetas por unas de forma recta sin ángulo de retraso, manteniendo las mismas longitudes de cruceta y del resto del modelo se verán las variaciones de transmisión de carga.

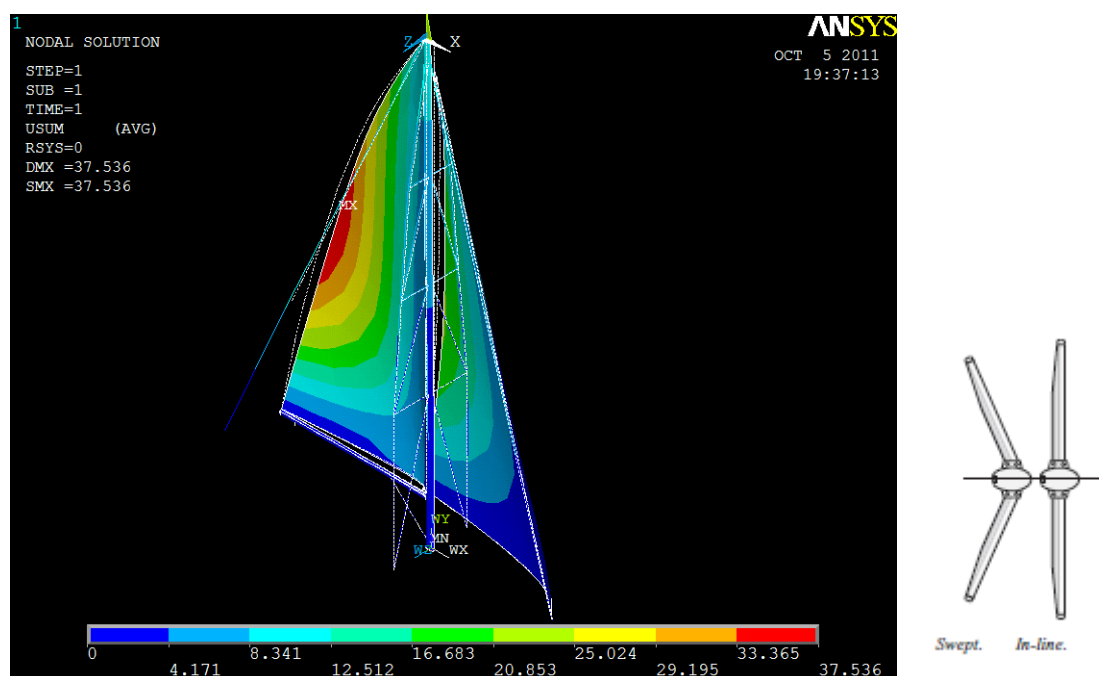


Figura 82: Desplazamientos crucetas rectas

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2151)	1,51E+08	-5,37E+08	-94.373	557958539,1
Obenques medios y altos estribor (2835)	-5,73E+02	-1,87E+09	1,46E+08	1876408931
Obenques medios y altos babor (2930)	-9,10E+02	-1,87E+09	-1,37E+08	1870636713
Backstay (2664)	-1,59E+08	-3,47E+08	98.433	381995114,2
Escota génova (2176)	-7,84E+05	3,75E+06	2,29E+05	3834817,52
Escota mayor (2640)	-2,56E+06	-1,66E+06	73950	3053816,676
Amura génova (1798)	4,48E+06	-1,17E+07	5,76E+05	12500947,46

Tabla 25: M7 Reacciones

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
11.384	3.882	1.2e9	6.07e8

Tabla 26: M7 Resultados

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.884	-996.24	-69.053
Esfuerzos en la base (kg)	-1,34E+07	3,92E+08	-7,27E+05
Desplazamientos perilla (cm)	-10,31817	-4,21144	1,53186

Tabla 27: M7 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) <2.1e11			
Backstay	0.75944E+09	2ºf. ob. int. estr.	0.97419E+09
Estay	0.11093E+10	3ºf. ob. int. estr.	0.11471E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.26007E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.19264E+10
2ºf. ob. alt. estr.	0.20947E+10	2ºf. ob. int. bab.	0.95916E+09
3ºf. ob. alt. estr.	0.14722E+10	3ºf. ob. int. bab.	0.11041E+10
4ºf. ob. alt. estr.	0.14937E+10	1ºCruceta estr.	-0.50601E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.26600E+10	2ºCruceta estr.	-0.16990E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.21622E+10	3ºCruceta estr.	-0.21197E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.15631E+10	1ºCruceta bab.	-0.50987E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.15859E+10	2ºCruceta bab.	-0.16354E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.20539E+10	3ºCruceta bab.	-0.22506E+07

Tabla 28: M7 Esfuerzos axiales jarcia

Conclusiones

Comparando el modelo con las crucetas rectas y el modelo con las crucetas retrasadas, tanto en reacciones como en tensiones el primero es ligeramente superior al segundo; sin embargo, las reacciones en la coz son un poco menores y que la deformación de la perilla es mayor.

En vista de los resultados, este modelo lo descartaremos siendo válido todavía el modelo 6.

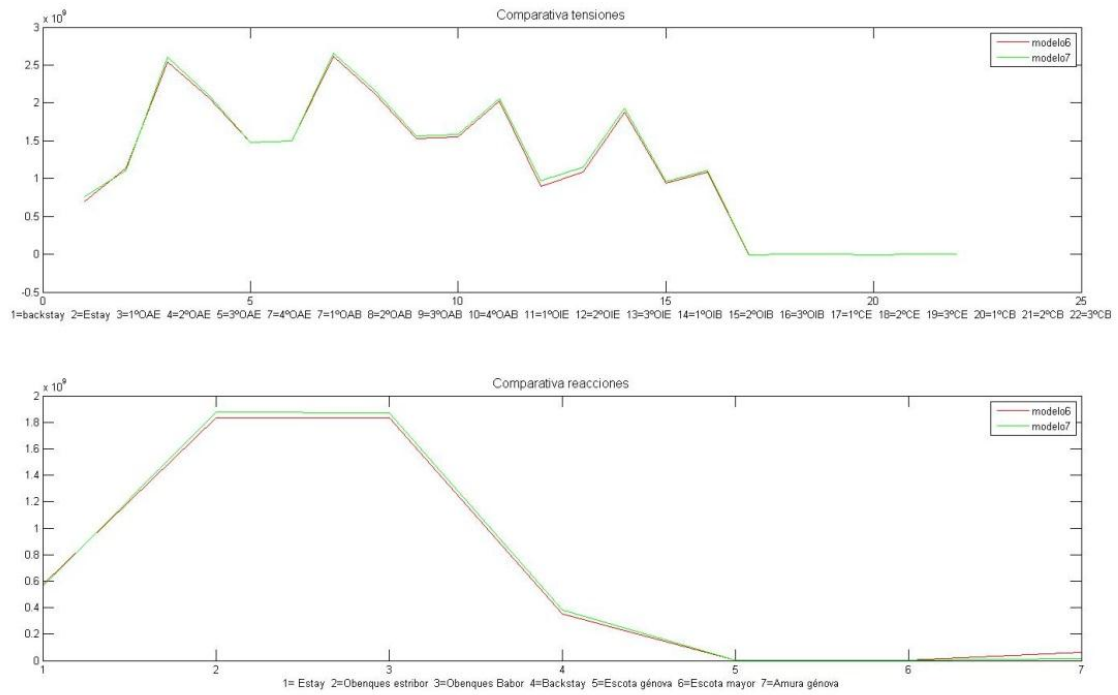
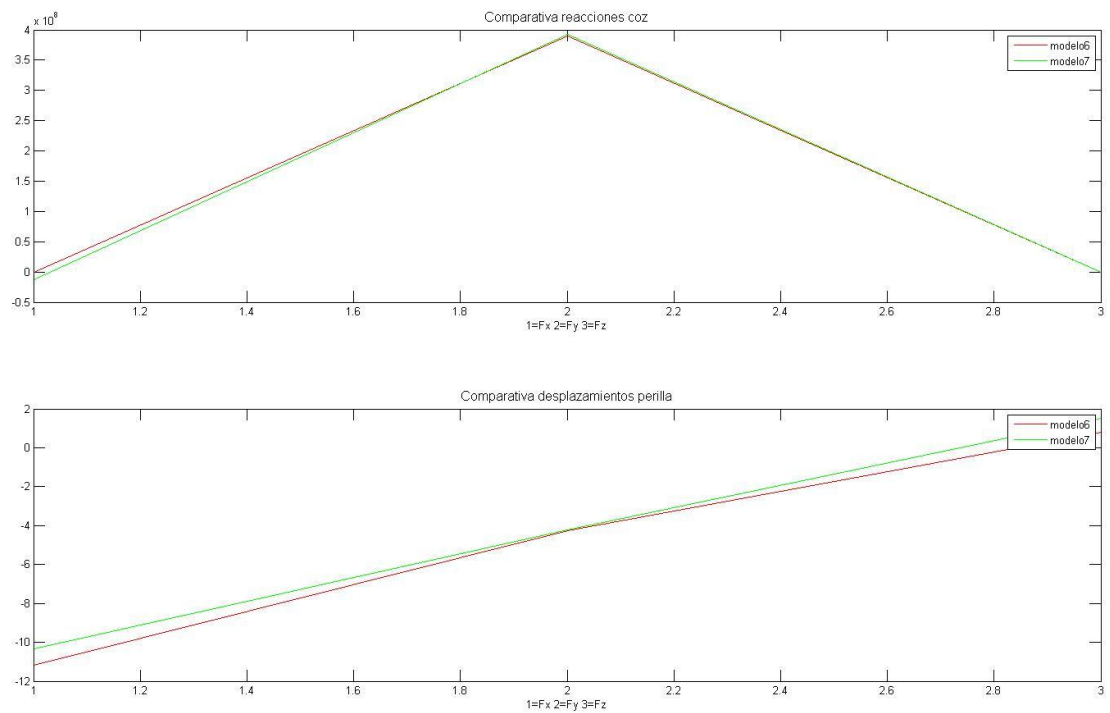


Figura 83: Comparativa M6 y M7



5.3. Modelo 8: Babystay

Como se vio en el apartado de “Descripción del aparejo actual” el babystay es regulable por lo que se puede adaptar para la fase de vientos portantes, ya es susceptible de quitarlo o aflojarlo a conveniencia.

Para que sea paralelo al estay se anclará al segundo piso de crucetas y a 339.36cm de la coza del mástil.

Sin pretensión

Obteniendo una forma más similar a la buscada.

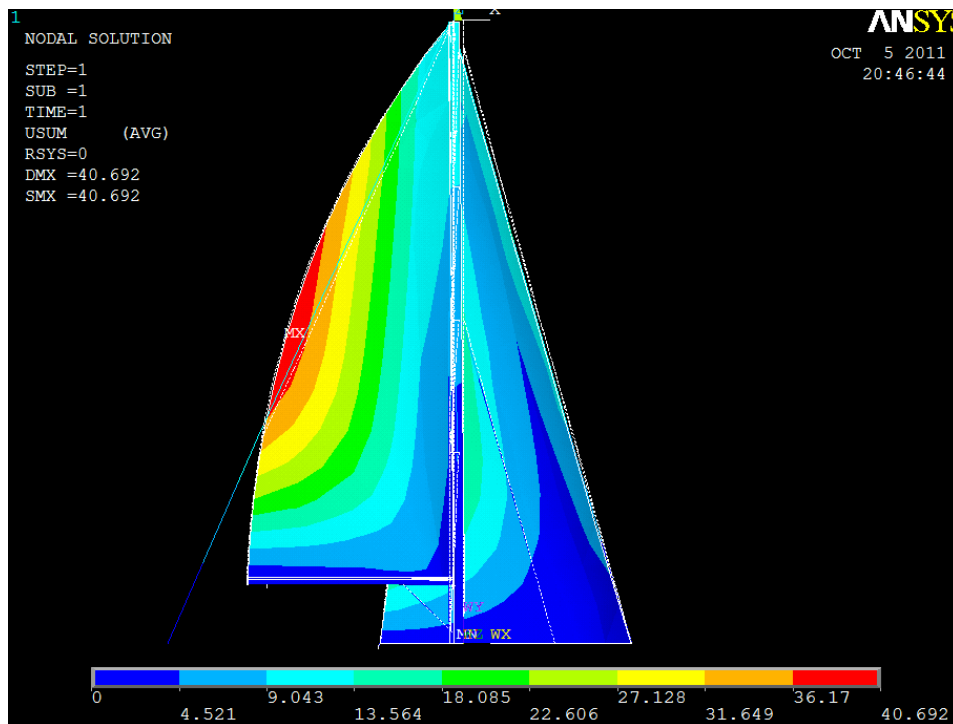


Figura 84: M8 deformación sin pretensión

Con pretensión

Dando 5cm de acortamiento se adopta una deformación $\varepsilon = \frac{5}{883} = 0.0057$, consiguiendo mantener la zona media del mástil vertical y flexar la mitad superior, apareciendo así la forma buscada para la vela.

Elemento	Tipo elemento	Constantes reales										Material			
		Nº	Espesor (cm)	Preten	Área (cm ²)	Izz (cm ⁴)	Iyy (cm ⁴)	TKZ (cm)	TKY (cm)	IXX (cm ⁴)	φ (cm)	Nº	Módulo Elástico (kg cm/s ² cm ²)	Densidad (kg/cm ³)	Tipo
Mástil	Shell63	1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Crucetas	Beam4	3	-	-	36.7	328	37.51	3.5	10.5	150.1	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Botavara	Shell63	2	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Obenques altos	Beam4	11	-	0.0125	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Obenques intermedios	Beam4	8	-	0.0125	0.283	0.0108	0.0108	0.6	0.6	0.0432	6	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Estay	Beam4	7	-	0.0061	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Backstay	Beam4	12	-	0.0081	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Mayor	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2.3e11	0.00138	Carbono
Génova	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Spi	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Tangón	Pipe16	10	0.3	-	-	-	-	-	-	-	20	1	7e10	0.00267	Aluminio
Drizas y amantillos	Beam4	6	-	0.083	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Escotas	Beam4	8	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	AISI 316
Drizas	Beam4	13	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Pajarín	Beam4	14	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Babystay	Beam4	15	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316

Figura 85: M8 Características con babystay

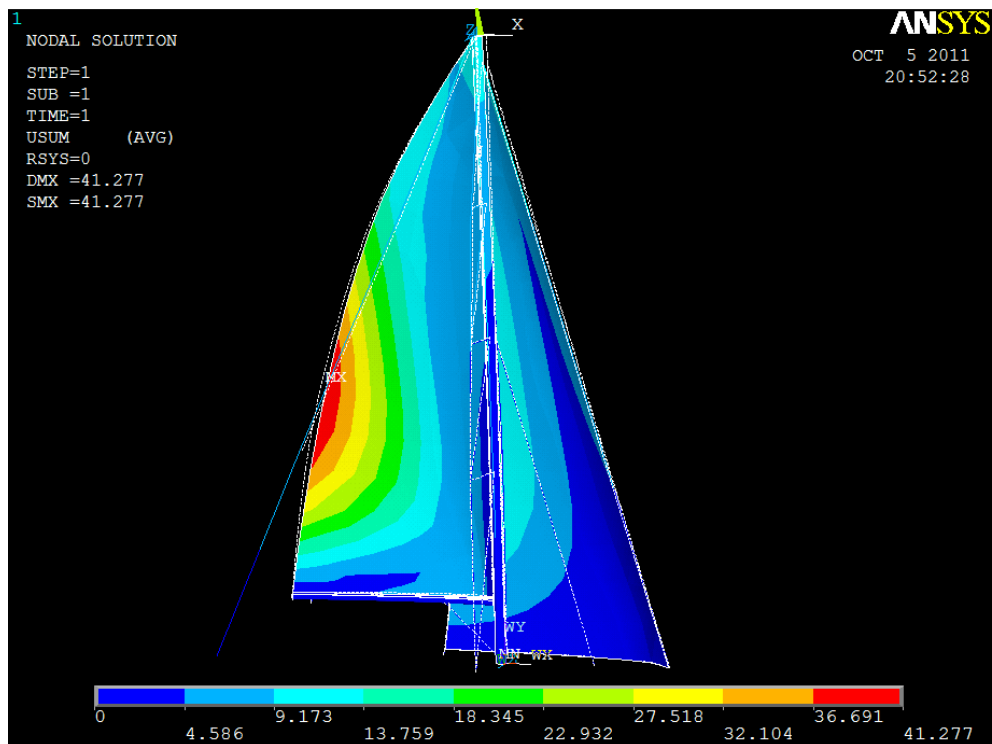


Figura 86: M8 deformación con pretensión

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2151)	1,51E+08	-5,38E+08	-113,28	558810176
Obenques medios y altos estribor (2446)	-2,87E+07	-1,84E+09	1,48E+08	1841444908
Obenques medios y altos babor (2470)	-2,47E+07	-1,82E+09	-1,27E+08	1828487120
Backstay (2664)	-1,52E+08	-3,31E+08	116	363953195
Escota génova (2176)	-7,94E+05	3,59E+06	2,18E+05	3685775,9
Escota mayor (2640)	-3,29E+06	3,44E+06	4,47E+04	4760425,59
Amura génova (1798)	6,07E+06	-1,74E+07	5,71E+05	18392755,1
Babystay (2754)	8,95E+07	-3,18E+08	83.625	330055943

Tabla 29: M8 Reacciones

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
12.559	4.254	1.18e9	8.19e9

Tabla 30: M8 Resultados

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.884	-996.24	-69.053
Esfuerzos en la base (kg)	-1,39E+07	4,10E+08	-1,67E+06
Desplazamientos perilla (cm)	-10,78033	-4,31010	4,46377

Tabla 31: M8 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) <2.1e11			
Backstay	0.65617E+09	3ºf. ob. int. estr.	0.10385E+10
Estay	0.11109E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.18176E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.24993E+10	2ºf. ob. int. bab.	0.82497E+09
2ºf. ob. alt. estr.	0.19355E+10	3ºf. ob. int. bab.	0.10876E+10
3ºf. ob. alt. estr.	0.13719E+10	1ºCruceta estr.	-0.51649E+07
4ºf. ob. alt. estr.	0.13919E+10	2ºCruceta estr.	-0.15378E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.26362E+10	3ºCruceta estr.	-0.19755E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.22093E+10	1ºCruceta bab.	-0.47940E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.16191E+10	2ºCruceta bab.	-0.16107E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.16428E+10	3ºCruceta bab.	-0.23315E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.21108E+10	Babystay	0.65617E+09
2ºf. ob. int. estr.	0.10827E+10		

Tabla 32: M8 Esfuerzos axiales jarcia

Conclusiones

Viendo los resultados se deduce que la incorporación del babystay tiene dos facetas:

Por un lado reduciendo la tensión en el estay y en la primera fase de los obenques altos pero el resto de superestructura se carga más; las reacciones son muy similares, pero, a favor del babystay, se libera carga al anclaje de la escota del génova.

Por supuesto, al introducir un nuevo cable con tensión, la reacción de la coz en el eje vertical aumenta, aunque, gracias a él, conseguimos deformar más la perilla del mástil que con el modelo 6.

La incorporación de babystay puede ser útil, en su contra tiene que se trata de un elemento más que eleva el coste, que dificulta la maniobra en la proa del barco y de que debe trimarse para cada condición meteorológica. Se mantendrá para el análisis de las burdas que viene a continuación.

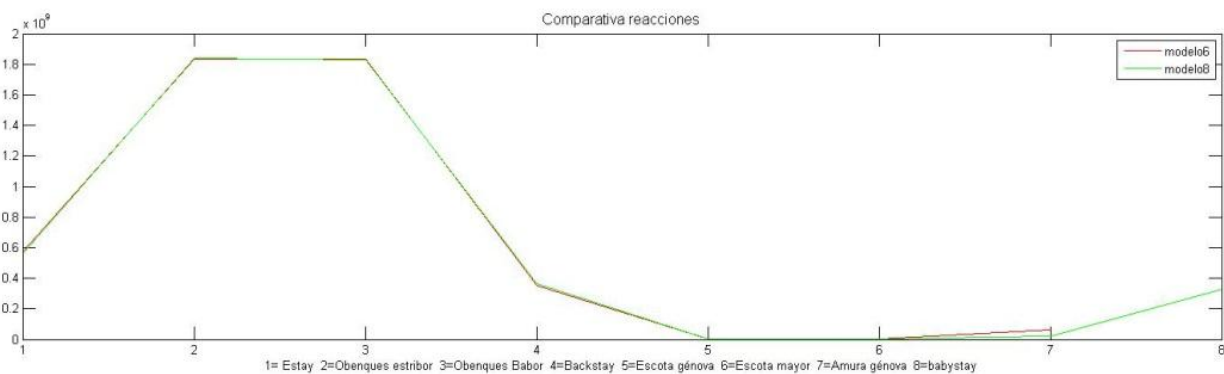
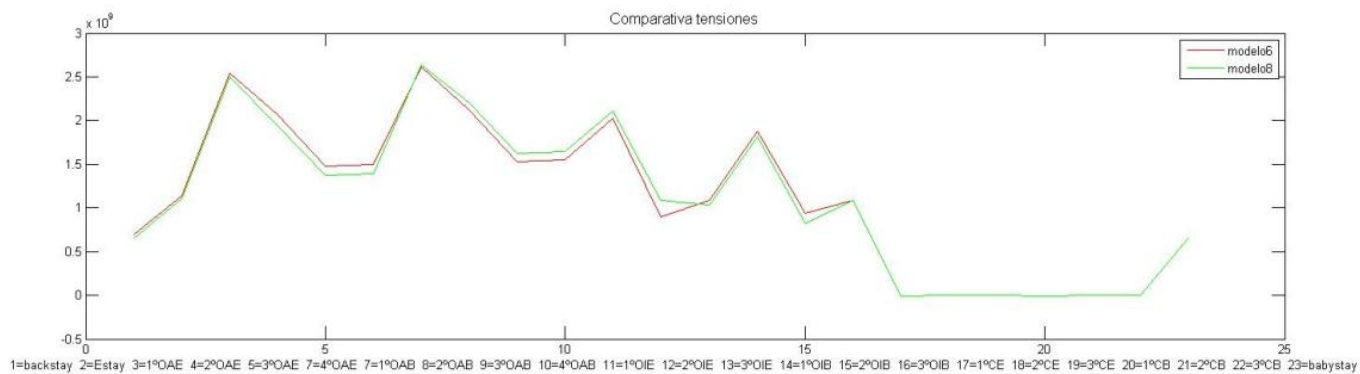
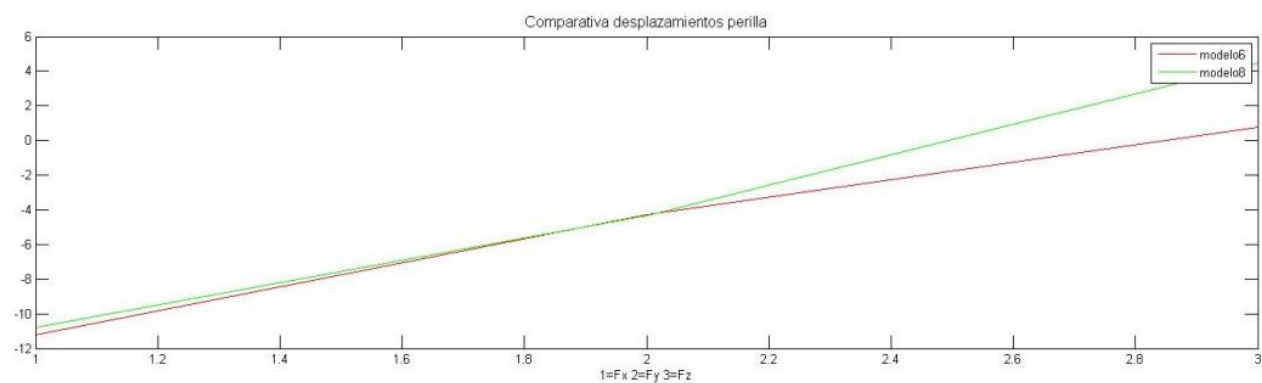
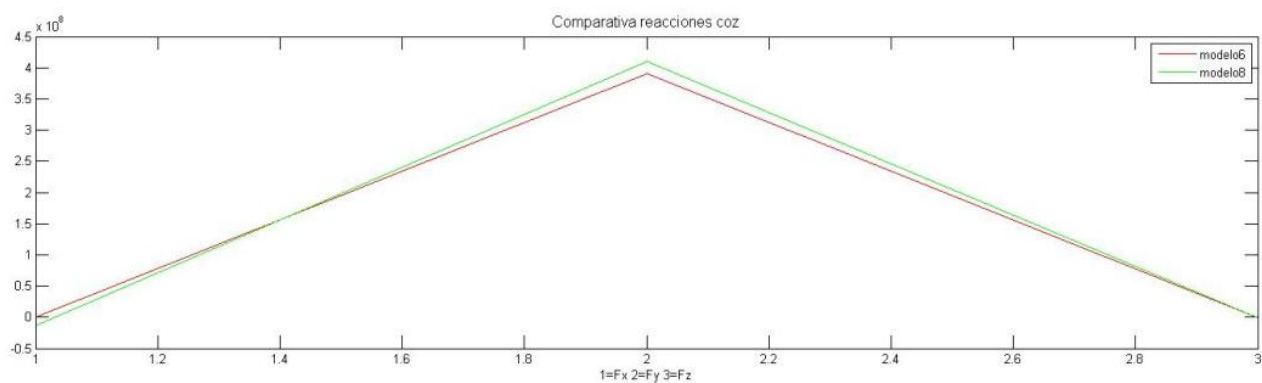


Figura 87: Comparativa M6 y M8



5.4. Modelo 9: Violines

Implementando unos violines en la parte superior del mástil se puede estudiar el comportamiento de la perilla cuando se tensen los diamantes.

Tomando dos violines simétricos de 30cm cada uno con una inclinación de 23° y un cable de unión entre crucetas para evitar su apertura y asegurarse una buena dirección de la tracción, daremos una $\varepsilon = \frac{2}{66} = 0.03$

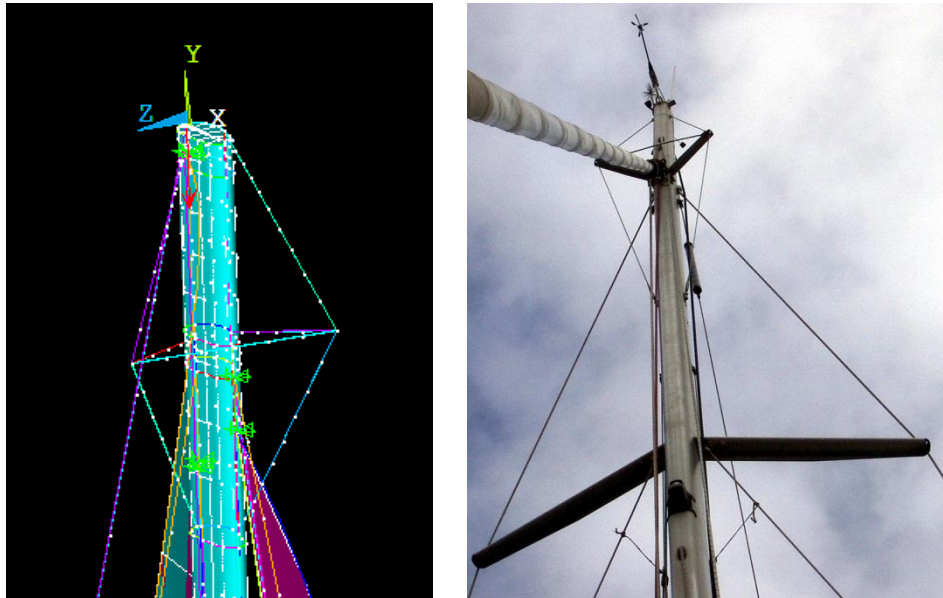


Figura 88: Violines

Parando en la siguiente figura, se retiene ligeramente la caída de la perilla, pero a costa de invertir ligeramente la panza en la parte superior.



Figura 89: M9 desplazamiento y tensión perilla

En las imágenes anteriores, las solicitaciones que introducen los violines, aumentan mucho las tensiones y deforman el perfil en la parte superior sin mejorar la deformada.

Sin babystay

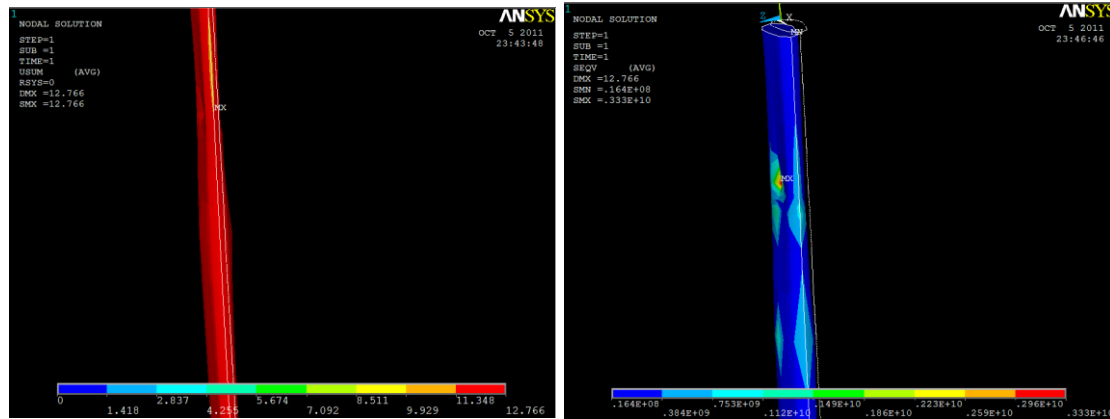


Figura 90: M9 sin babystay

Se aprecia el abombado de la fuerza de los diamantes y el hueco que provoca la compresión en los violines.

Conclusión

Una posible solución que se podría adoptar es alargar los perfiles, es decir, aumentar el fraccionamiento del palo, alargando la parte libre desde el último arraigo de los obenques hasta la perilla, así se podría instalar un violín más esbelto y con mejor tiro, incluso compartir el arraigo con algún obenque inferior contrarrestando la tracción de uno con el otro.

En definitiva, con el perfil existente no es necesaria la implantación de un violín.

5.5. Modelo 10: Burdas

Para nuestro primer modelo con burdas se empleará el babystay y a continuación el estudio sin éste; probaremos a introducirlo también con el violín.

Siempre existen dos, una a cada lado, aunque sólo trabaja la de barlovento, por lo que sólo se implementará los de estribor.

Burdas con babystay sin violín

El primer modelo se simula sin pretensión de burda, observando como el perfil se mantiene casi perfectamente recto hasta el último tramo, donde consigue la curva de la perilla que se estaba buscando.

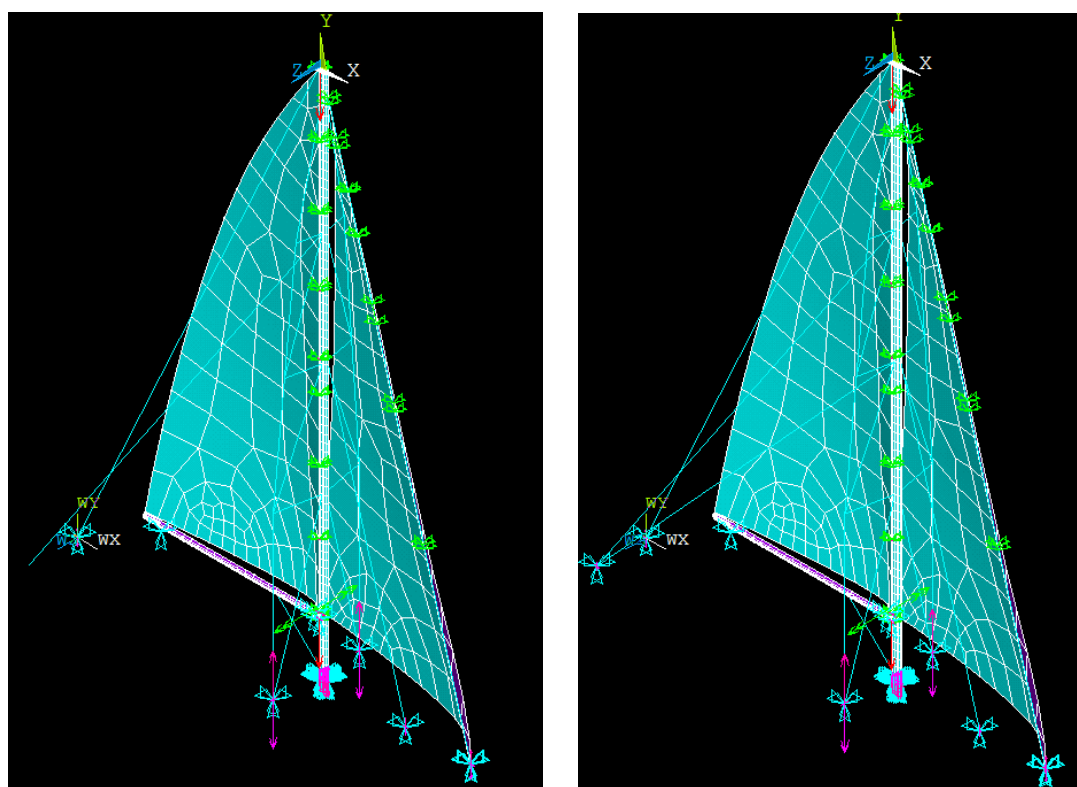


Figura 91: Burdas altas (izq.) y bajas (dcha.) con babystay y sin violín

Incorporando la burda baja queda controlada mejor la panza del perfil, con el babystay se asegura que no se invierta la curvatura, en principio no es necesario aplicar pretensiones excesivas a las burdas, simplemente tensarlas para que no tengan holgura y así no invertir curvatura.

Los anclajes de las burdas están a 150 cm del backstay en dirección 'z', aprovechando la mayor distancia hacia popa que tiene el casco.

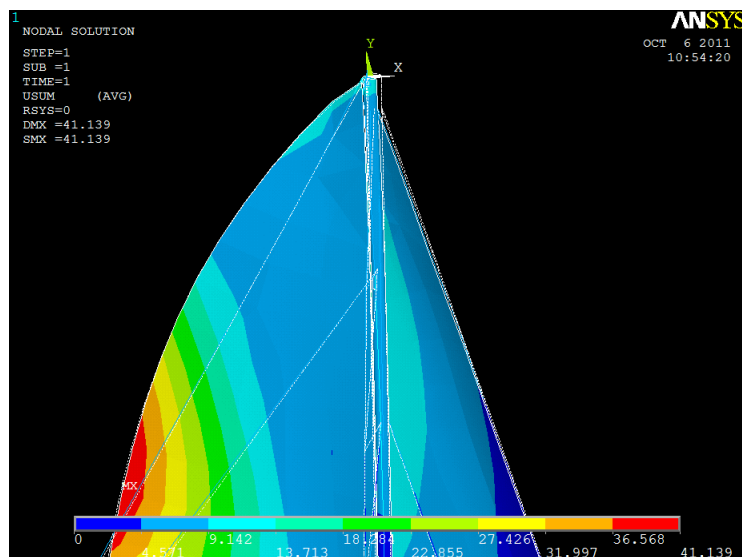


Figura 92: M10 Desplazamiento mástil con burda alta

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
10.493	4.366	1.34e9	8.87e8

Tabla 33: M7 Resultados sin pretensión altas

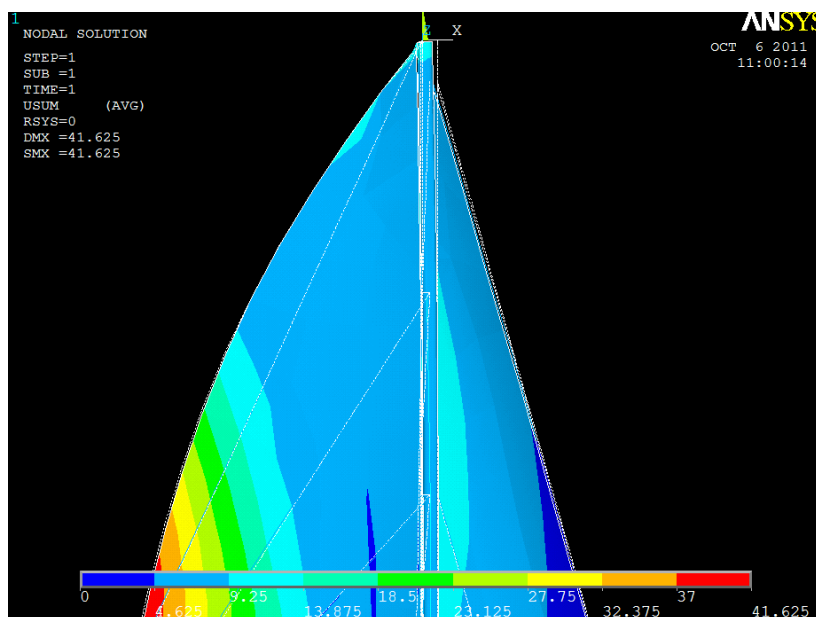


Figura 93: M10 Desplazamiento mástil con burda alta y baja

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
10.472	4.393	1.35e9	9.12e8

Tabla 34: M10 Resultados sin pretensión altas y bajas

Elemento	Tipo elemento	Constantes reales										Material			
		Nº	Espesor (cm)	Preten	Área (cm ²)	Izz (cm ⁴)	Iyy (cm ⁴)	TKZ (cm)	TKY (cm)	IXX (cm ⁴)	φ (cm)	Nº	Módulo Elástico (kg cm/s ² cm ²)	Densidad (kg/cm ³)	Tipo
Mástil	Shell63	1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Crucetas	Beam4	3	-	-	36.7	328	37.51	3.5	10.5	150.1	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Botavara	Shell63	2	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Obenques altos	Beam4	11	-	0.0125	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Obenques intermedios	Beam4	8	-	0.0125	0.283	0.0108	0.0108	0.6	0.6	0.0432	6	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Estay	Beam4	7	-	0.0061	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Backstay	Beam4	12	-	0.0081	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Mayor	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2.3e11	0.00138	Carbono
Génova	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Spi	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Tangón	Pipe16	10	0.3	-	-	-	-	-	-	-	20	1	7e10	0.00267	Aluminio
Drizas y amantillos	Beam4	6	-	0.083	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Escotas	Beam4	8	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	AISI 316
Drizas	Beam4	13	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Pajarín	Beam4	14	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Babystay	Beam4	15	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero
Burdas	Beam4	16	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero

Tabla 35: Características con burdas

Pretensión en las burdas

Introduciendo una ligera pretensión en las burdas para mejorar el perfil de ataque del génova y estabilizar más el perfil del mástil de $\varepsilon = \frac{2}{1300} = 0.0015$

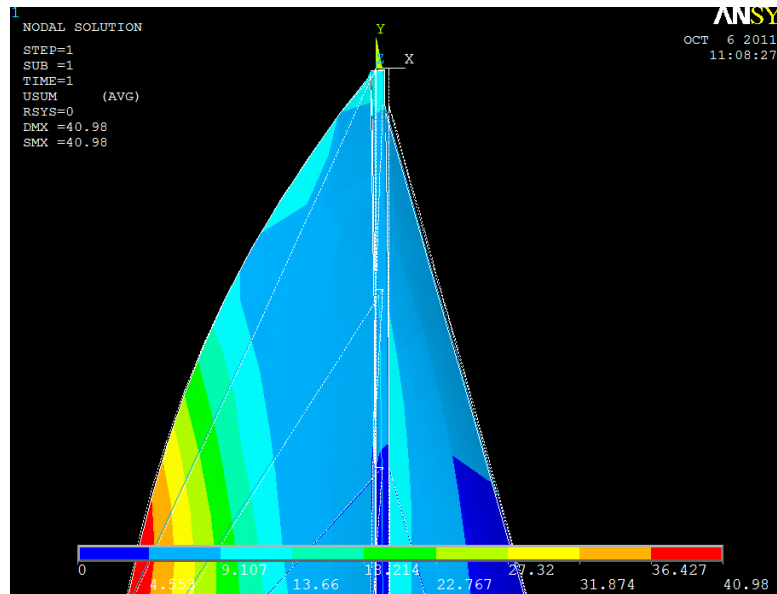
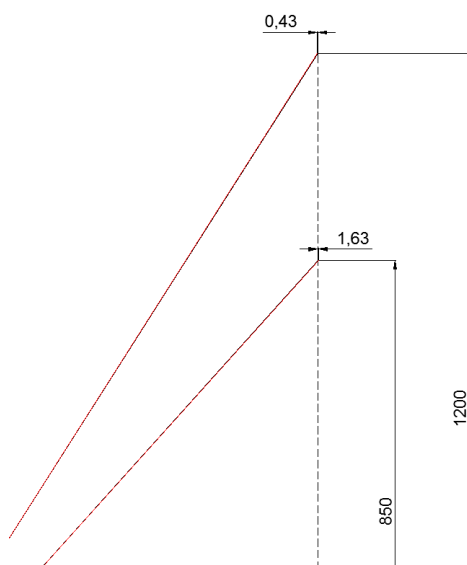


Figura 94: M10 Desplazamiento perilla

Debido al desplazamiento previo del mástil sin burdas, la pretensión a dar a las burdas debe contrarrestar la reducción de distancia por la caída más la tensión que se busca, ya que si no estarían comprimidas y no podrían trabajar así; de esta forma, las pretensiones calculadas como a continuación son:



$$BA1 = 1422.7 \text{ cm}$$

$$BA2 = \sqrt{1200^2 + (764.25 - 0.43)^2} = 1422.5$$

$$\Delta L = 0.23 \text{ cm} \rightarrow \varepsilon = \frac{0.23 + 7}{1422.7} = 0.0056$$

La burda baja esta traccionada por el babystay

$$BA2 = 1143.06 \text{ cm}$$

$$BA2 = \sqrt{850^2 + (764.25 + 1.63)^2} = 1144.15$$

$$\Delta L = 1.087 \text{ cm} \rightarrow \varepsilon = \frac{1.087 + 5.3}{1143.06} = 0.0056$$

Figura 95: M10 Caída mástil

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²)< 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
13.568	4.107	1.12e9	7.05e8

Tabla 36: M10 Resultados pretensión

En la próxima figura se aprecia la diferencia de desplazamientos y tensiones en perilla y botavara para los tres tipos de burdas que se han implementado.

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.884	-996.24	-69.053
Esfuerzos en la base (kg)	-1.5165e+007	4.5974e+008	-1.2276e+006
Desplazamientos perilla (cm)	-12.8695	-4.8524	4.8042

Tabla 37: M10 Cdg, reacciones en la cox y desplazamiento perilla

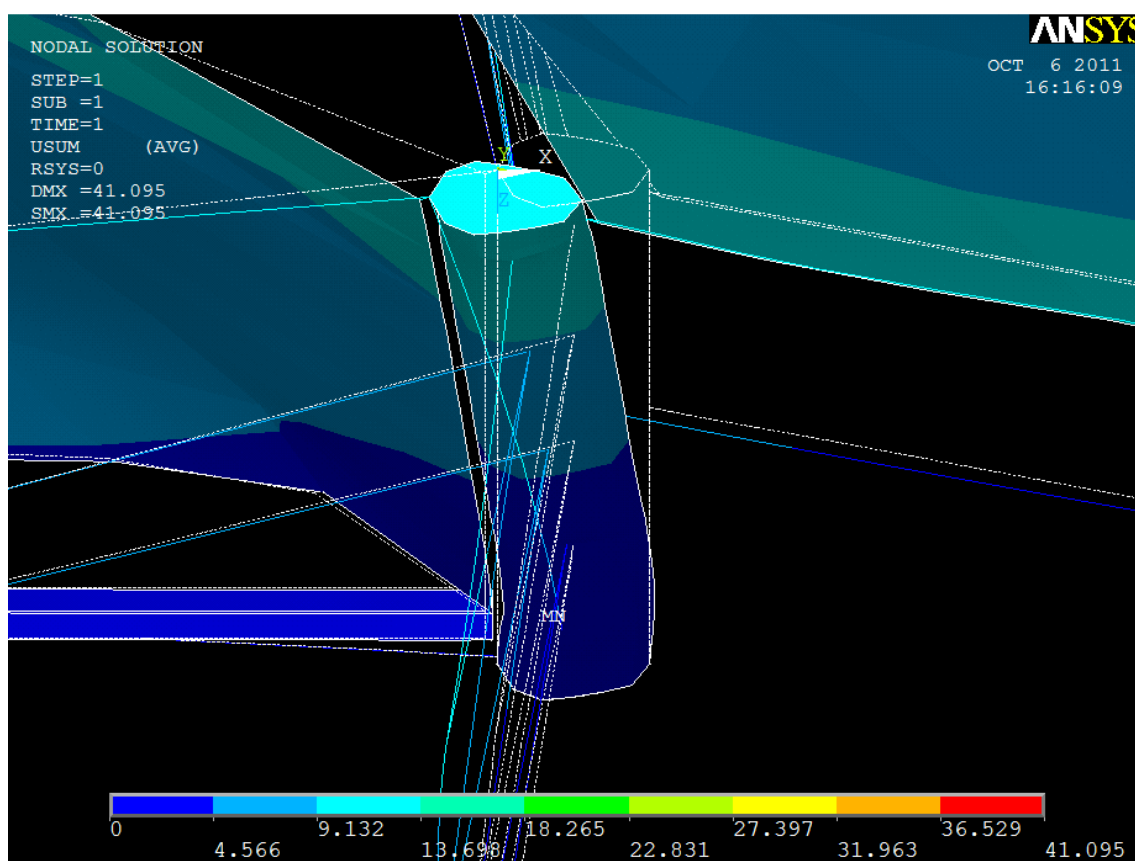


Figura 96: M10 Desplazamiento

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2151)	1,54E+08	-5,47E+08	-357	568025755
Obenques medios y altos estribor (2446)	-2,56E+07	-1,73E+09	1,31E+08	1739664588
Obenques medios y altos babor (2470)	-2,62E+07	-1,85E+09	-1,35E+08	1859479050
Backstay (2664)	-1,40E+08	-3,05E+08	101	335332805
Escota génova (2176)	-3,05E+06	4,81E+06	2,63E+05	5703807,76
Escota mayor (2640)	-2,70E+06	-3,48E+05	7,21E+04	2722061,94
Amura génova (1798)	2,95E+07	-9,92E+07	6,84E+05	103539499
Babystay	1,10E+08	-3,92E+08	-150,05	406914380
Burdas	-9,31E+07	-1,13E+08	17.572.000	147816240

Tabla 38: M10 Reacciones

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) <2.1e11			
Backstay	0.66667E+09	3ºf. ob. int. estr.	0.98834E+09
Estay	0.11293E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.19287E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.24240E+10	2ºf. ob. int. bab.	0.95541E+09
2ºf. ob. alt. estr.	0.19843E+10	3ºf. ob. int. bab.	0.10985E+10
3ºf. ob. alt. estr.	0.14480E+10	1ºCruceta estr.	-0.45919E+07
4ºf. ob. alt. estr.	0.14691E+10	2ºCruceta estr.	-0.14637E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.26364E+10	3ºCruceta estr.	-0.20851E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.21405E+10	1ºCruceta bab.	-0.50633E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.15443E+10	2ºCruceta bab.	-0.16268E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.15668E+10	3ºCruceta bab.	-0.22237E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.18811E+10	Babystay	0.80896E+09
2ºf. ob. int. estr.	0.84771E+09	Burdas altas	0.79924E+08
		Burdas bajas	0.21474E+09

Tabla 39: M10 Esfuerzos axiales jarcia

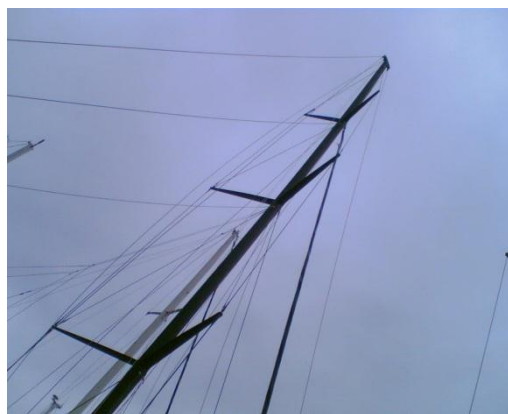


Figura 97: Jarcia con burdas

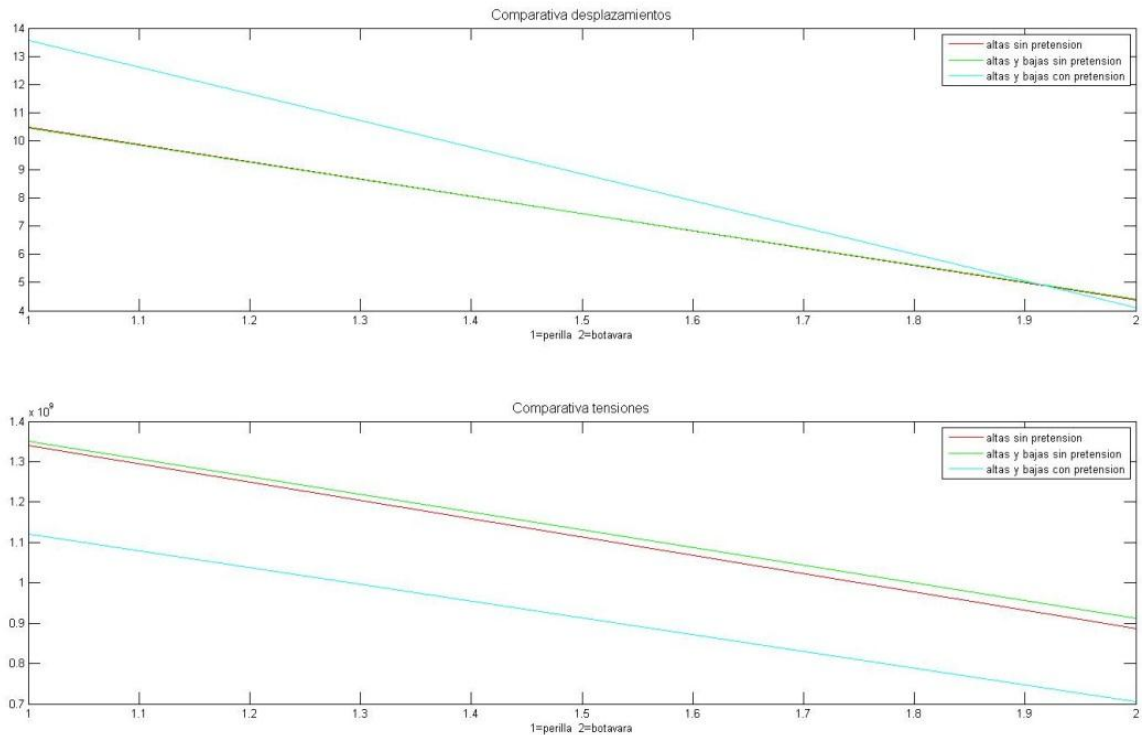


Figura 98: Comparativa modelo 10

Conclusión

A la vista de los resultados queda claro la bondad de un sistema doble de burdas altas y bajas y de pretensión, con ello se reduce las tensiones en el mástil y en la botavara; aumentando el desplazamiento de la perilla hacia popa sin deformar el palo y reduciendo un poco las deformaciones en la botavara.

Por tanto, el sistema de burdas con babystay puede ser una buena opción para sostener la “barriga” del mástil y aumentar los desplazamientos de la perilla sin perjudicar el perfil.

5.6. Modelo 11: Burdas sin babystay

Analizando el modelo anterior, eliminando el babystay, el cual, como se ha visto, puede ser prescindible por el engorro en las maniobras de proa se consiguen los siguientes resultados:

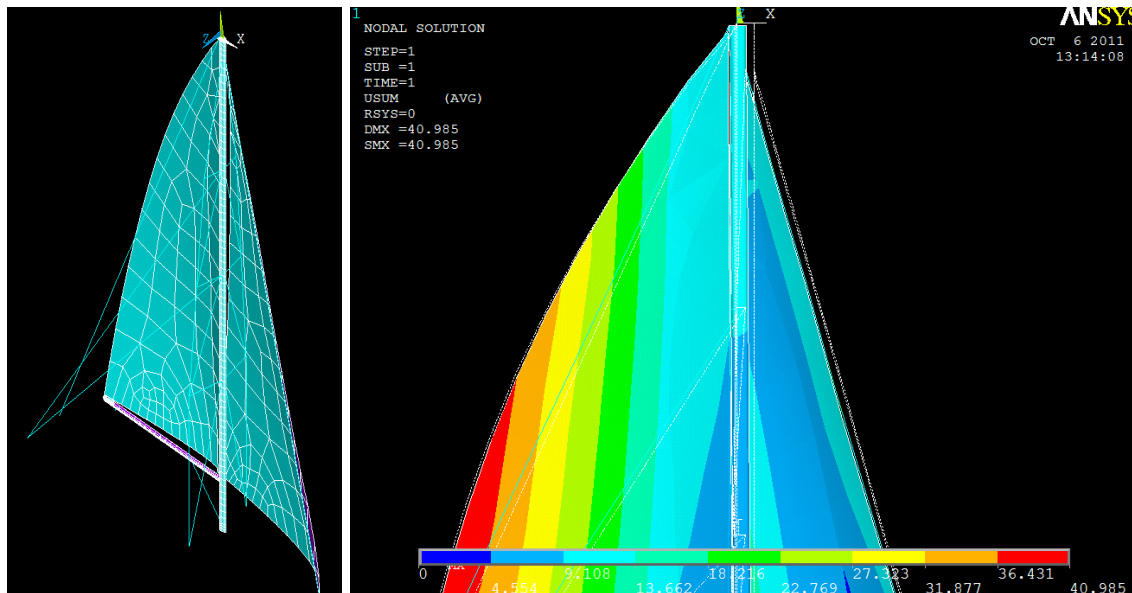


Figura 99: M11 Burdas sin babystay

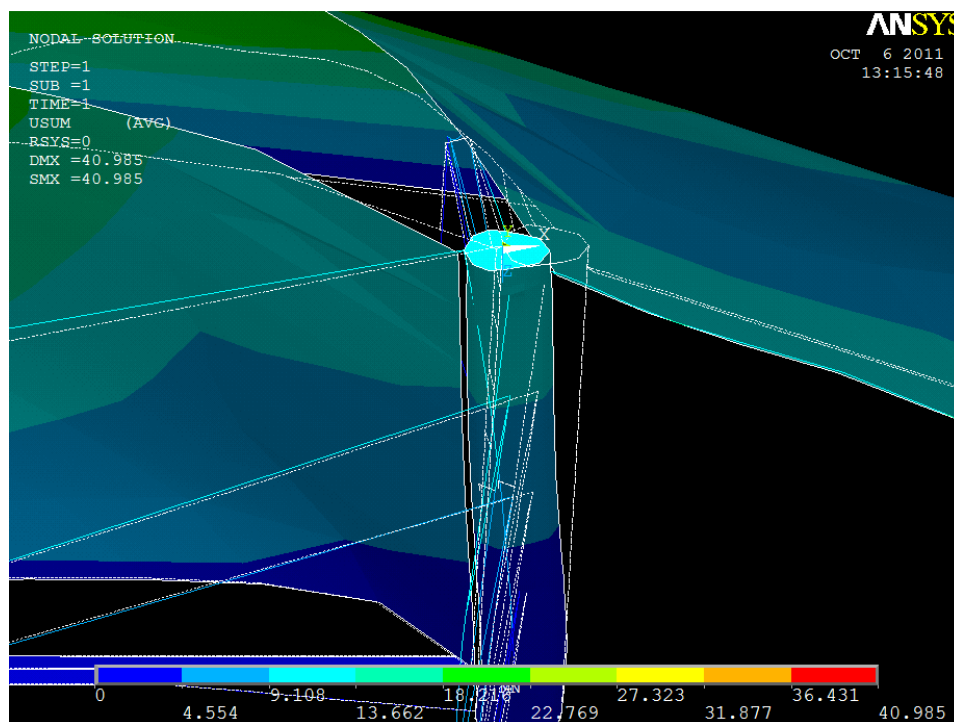


Figura 100: M11 Desplazamiento mástil

La parte superior se deforma recta, desplazándose la curvatura a la zona baja del mástil.

Igual que en el anterior modelo, considerando la caída del palo sin burdas y recortando éstas 4 cm, garantizando que traccionen, nos queda:

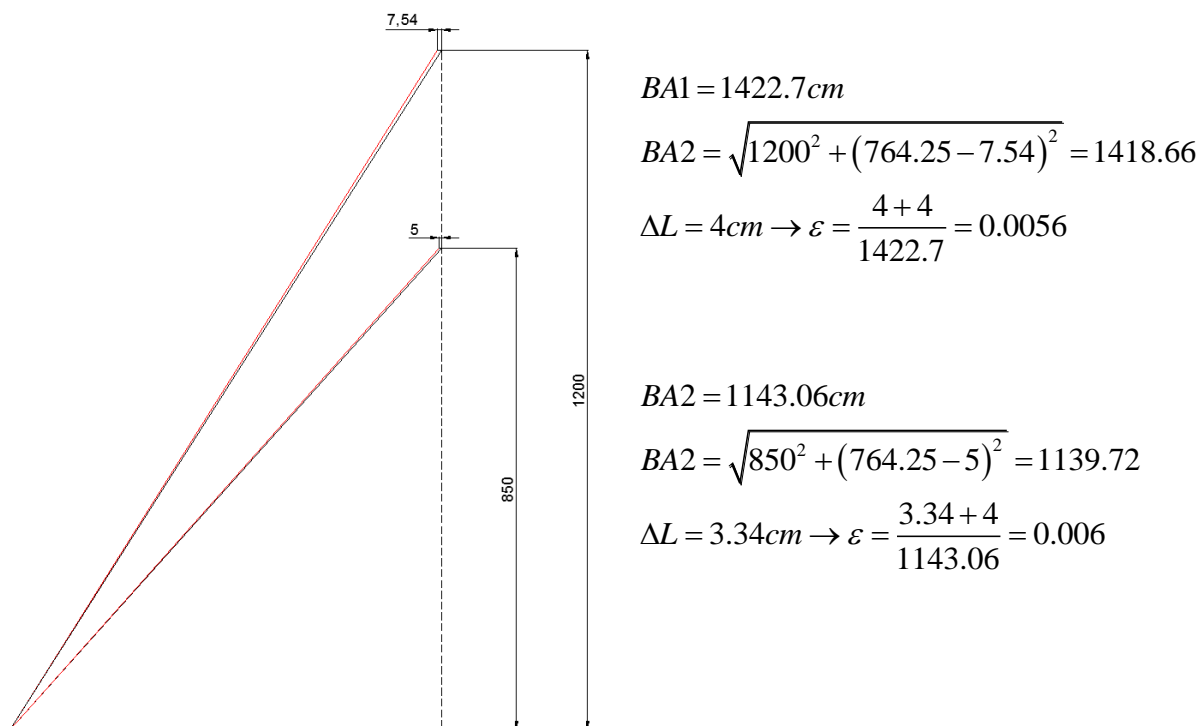


Figura 101: M11 Acortamiento burdas

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
12.831	3.811	1.1e9	5.8e8

Tabla 40: M11 Resultados pretensión

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2151)	1,57E+08	-5,56E+08	-617	577886914
Obenques medios y altos estribor (2446)	-2,64E+07	-1,80E+09	1,36E+08	1800310545
Obenques medios y altos babor (2470)	-2,61E+07	-1,84E+09	-1,34E+08	1844978868
Backstay (2664)	-1,42E+08	-3,09E+08	79.524	339642159
Escota génova (2176)	-1,23E+06	6,48E+06	3,23E+05	6604052,65
Escota mayor (2640)	-2,31E+06	-3,14E+06	9,09E+04	3904309,77
Amura génova (1798)	5,49E+07	-1,88E+08	8,34E+05	195462509
Burdas	-3,16E+07	-4,00E+07	5.964.800	51315795,1

Tabla 41: M11 Reacciones

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.884	-996.24	-69.053
Esfuerzos en la base (kg)	-1.4834e+007	4.3474e+008	-6.8364e+005
Desplazamientos perilla (cm)	-13.0114	-4.7290	1.0777

Tabla 42: M11 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) <2.1e11			
Backstay	0.67524E+09	3ºf. ob. int. estr.	0.10689E+10
Estay	0.11489E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.19212E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.25120E+10	2ºf. ob. int. bab.	0.99340E+09
2ºf. ob. alt. estr.	0.20929E+10	3ºf. ob. int. bab.	0.11014E+10
3ºf. ob. alt. estr.	0.15129E+10	1ºCruceta estr.	-0.46162E+07
4ºf. ob. alt. estr.	0.15349E+10	2ºCruceta estr.	-0.15830E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.26117E+10	3ºCruceta estr.	-0.21784E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.20956E+10	1ºCruceta bab.	-0.51127E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.14978E+10	2ºCruceta bab.	-0.16312E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.15197E+10	3ºCruceta bab.	-0.21568E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.19404E+10	Burdas altas	0.39064E+08
2ºf. ob. int. estr.	0.80946E+09	Burdas bajas	0.63283E+08

Tabla 43: M11 Esfuerzos axiales jarcia

Conclusiones

Con la ayuda de las burdas se controla mejor la forma del mástil, frente al uso con o sin babystay las diferencias no son representativas; el tema de manejar burdas es también tedioso para la maniobrabilidad, sobre todo en los amantes del crucero y, el perfil, tampoco se deforma de manera irregular o peligrosa al evitarse su excesiva curvatura por las crucetas atrasadas.

Sin embargo, las reacciones en la coz se reducen al comprimirse menos el tubo y se aumenta el desplazamiento de la perilla al eliminar el babystay, habría que vigilar un poco la torsión al cargar el palo por barlovento, aun así, comparando ambos modelos se escogería el modelo 11.

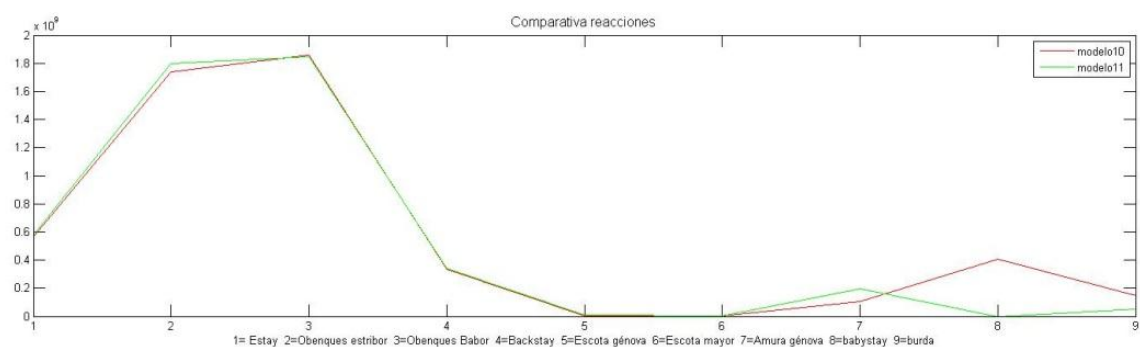
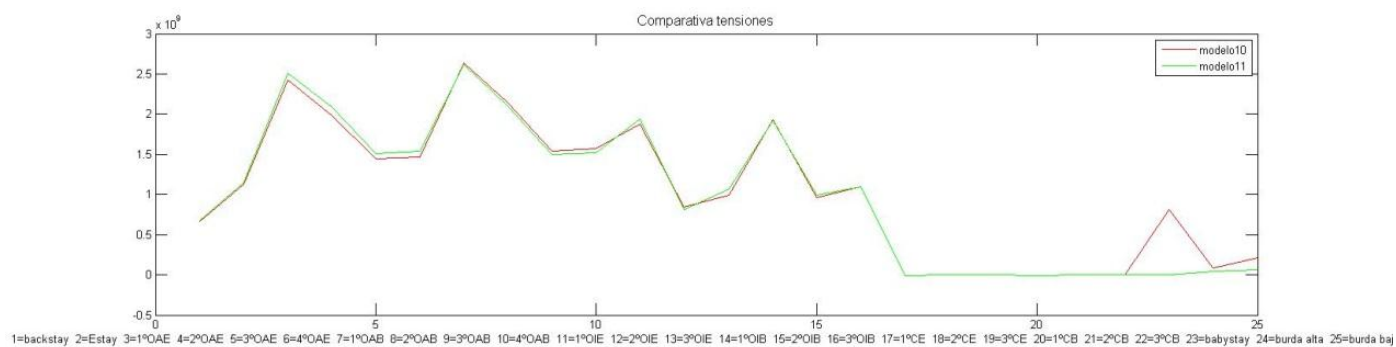
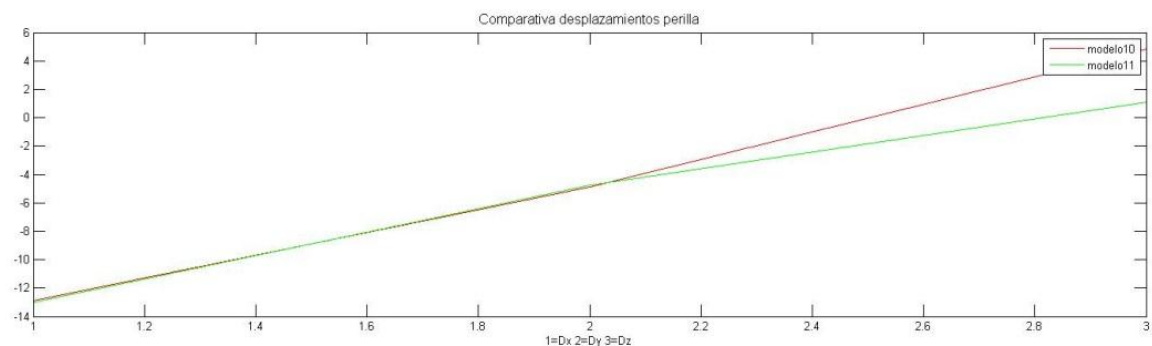
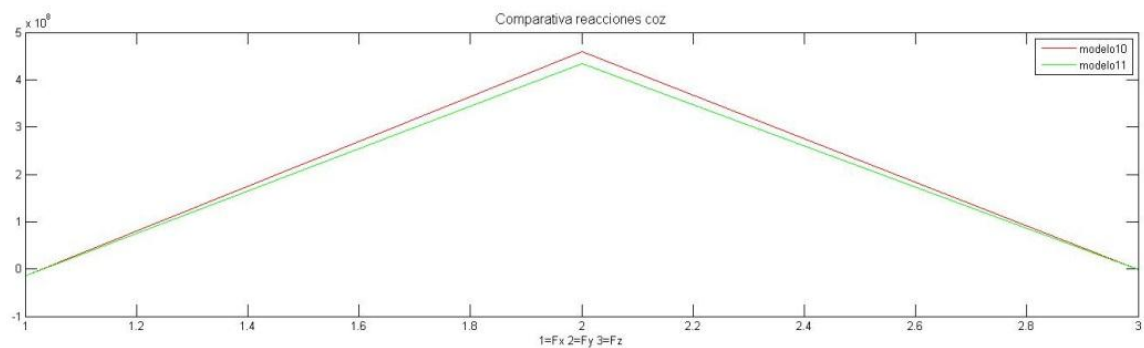


Figura 102: Comparativa M10 y M11



5.7.Conclusiones

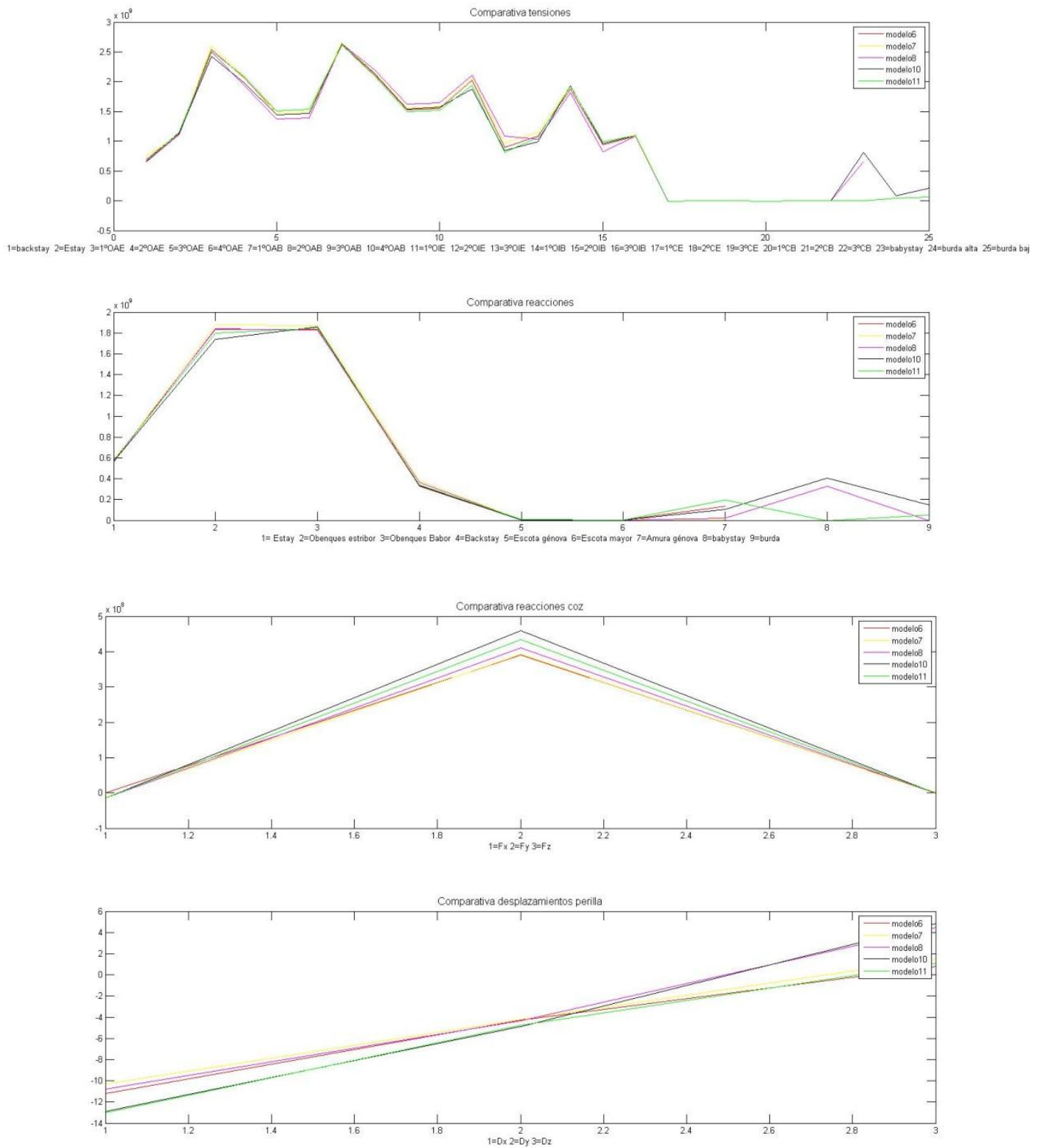


Figura 103: Comparativa modelos segunda fase

Viendo de un plumazo todos los modelos barajados se puede ver que todos ellos tienen bondades en algunas circunstancias:

- El modelo 10 parece ser el que provoca menos reacciones en los apoyos pero es el que más compresión en la coz proporciona. La perilla se consigue desplazar casi el máximo, pero en contra es el que más caída lateral proporciona.
- El modelo 8 es el que menos carga las partes inferiores de la jarcia y el estay y backstay.
- El modelo 6 es, junto al 7, el que menos compresión transmite a la coz. El desplazamiento lateral es de los más grandes, pero consigue una buena curvatura superior. En tensiones se sitúa por la zona intermedia y las reacciones también están centradas.
- El modelo 7 que parece ser el que más tensiones presenta en casi todos los casos, pero es el que menos compresión transmite a la coz. Es el que menos caída a popa consigue en la perilla.
- El modelo 11 es el que menos carga la zona superior, traduciéndolo en una mayor carga en la inferior. Consigue el mayor desplazamiento de la perilla a popa, cargando bastante la coz.

Estudiados los modelos hasta ahora, la superestructura a implantar serían la del modelo 6, o, de querer una mayor posibilidad de trimado, el modelo 11.

6. Tercera fase: modelo de palo continuo hasta quilla

Para apoyar el palo en la quilla se aumenta su perfil 200cm, la fogonadura no soporta el palo verticalmente, pero sí lo hace en las dos direcciones horizontales. La quilla soporta ahora la compresión y también los desplazamientos horizontales que pudieran quedar.

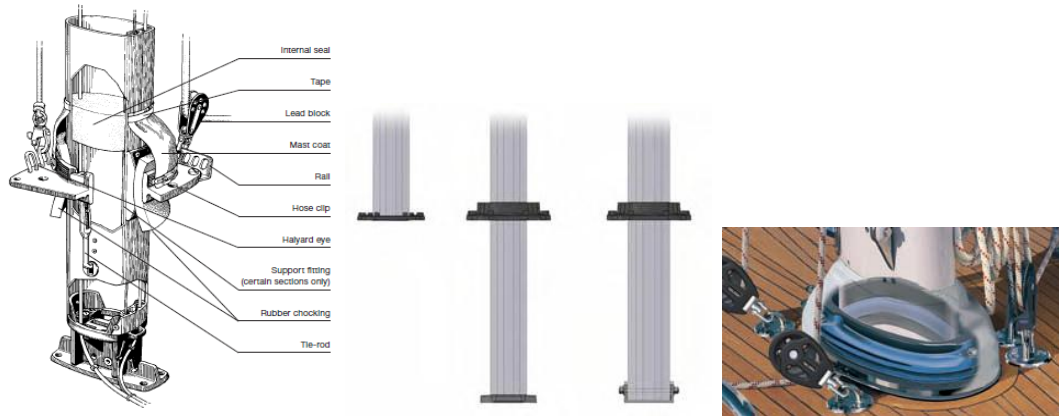


Figura 104: Fogonadura

6.1. Modelo 12: Palo apoyado en la quilla

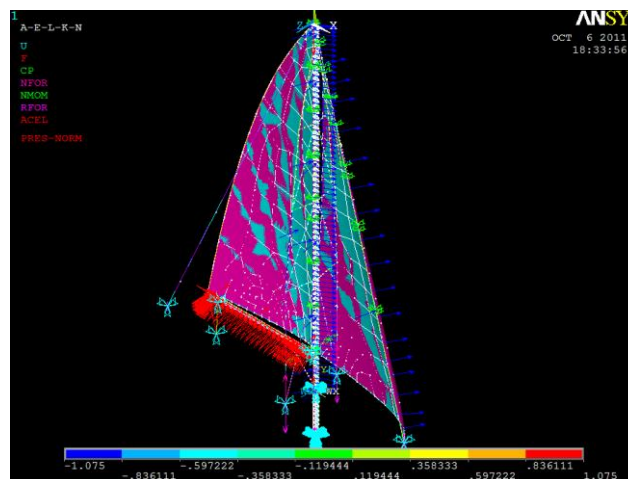


Figura 105: Mástil apoyado en la quilla

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²)< 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
13.942	4.362	2.15e9	7.23e8

Tabla 44: M11 Resultados pretensión

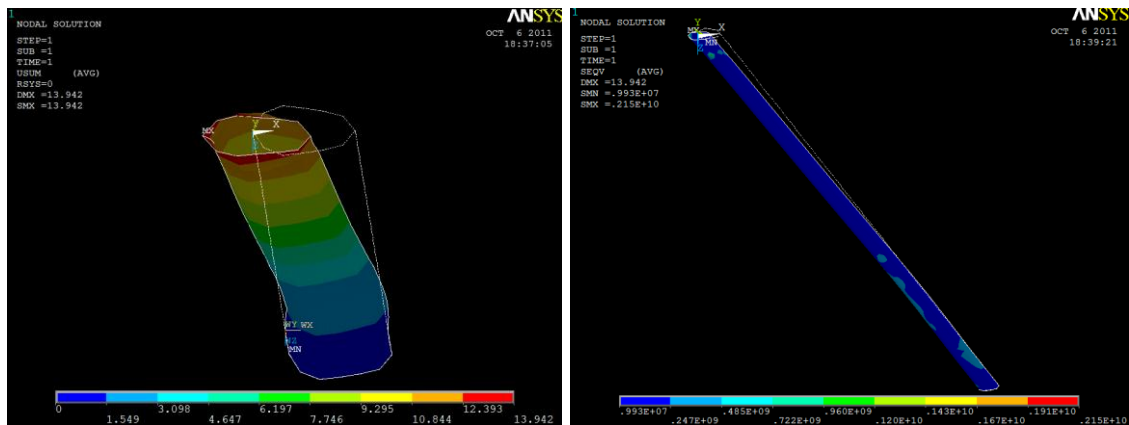


Figura 106: M12 Desplazamiento y tensiones

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2151)	1,53E+08	-5,42E+08	-252	563080737
Obenques medios y altos estribor (2446)	-2,49E+07	-1,73E+09	1,28E+08	1733718218
Obenques medios y altos babor (2470)	-2,28E+07	-1,73E+09	-1,17E+08	1730432893
Backstay (2664)	-1,23E+08	-2,69E+08	87	295839241
Escota génova (2176)	-9,24E+05	5,34E+06	3,02E+05	5428676,99
Escota mayor (2640)	-2,83E+06	8,15E+05	7,52E+04	2946648,25
Amura génova (1798)	1,88E+07	-6,13E+07	6,94E+05	64151235

Tabla 45: M12 Reacciones

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.368	-1002.7	-66.564
Esfuerzos en la base (kg)	4.3189e+006	361457500	2.1751e+005
Esfuerzos fogonadura (kg)	-1.5538e+007	0	-1.1037e+006
Desplazamientos perilla (cm)	-11.9213	-4.5963	1.2363

Tabla 46: M12 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) <2.1e11				
Backstay	0.58815E+09		2ºf. ob. int. estr.	0.79953E+09
Estay	0.11194E+10		3ºf. ob. int. estr.	0.10360E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.24391E+10		1ºf. ob. int. bab.	0.16785E+10
2ºf. ob. alt. estr.	0.20249E+10		2ºf. ob. int. bab.	0.83632E+09
3ºf. ob. alt. estr.	0.14627E+10		3ºf. ob. int. bab.	0.10378E+10
4ºf. ob. alt. estr.	0.14841E+10		1ºCruceta estr.	-0.45102E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.25181E+10		2ºCruceta estr.	-0.15344E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.20847E+10		3ºCruceta estr.	-0.21063E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.15216E+10		1ºCruceta bab.	-0.46788E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.15438E+10		2ºCruceta bab.	-0.15370E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.18326E+10		3ºCruceta bab.	-0.21911E+07

Tabla 47: M12 Esfuerzos axiales jarcia

Conclusiones

Al introducir el mástil en cubierta aumenta la resistencia de la parte baja del perfil, haciendo que la curvatura se inicie mucho más tarde; la fagonadura ahora se encuentra sometida a esfuerzos que hay que considerar.

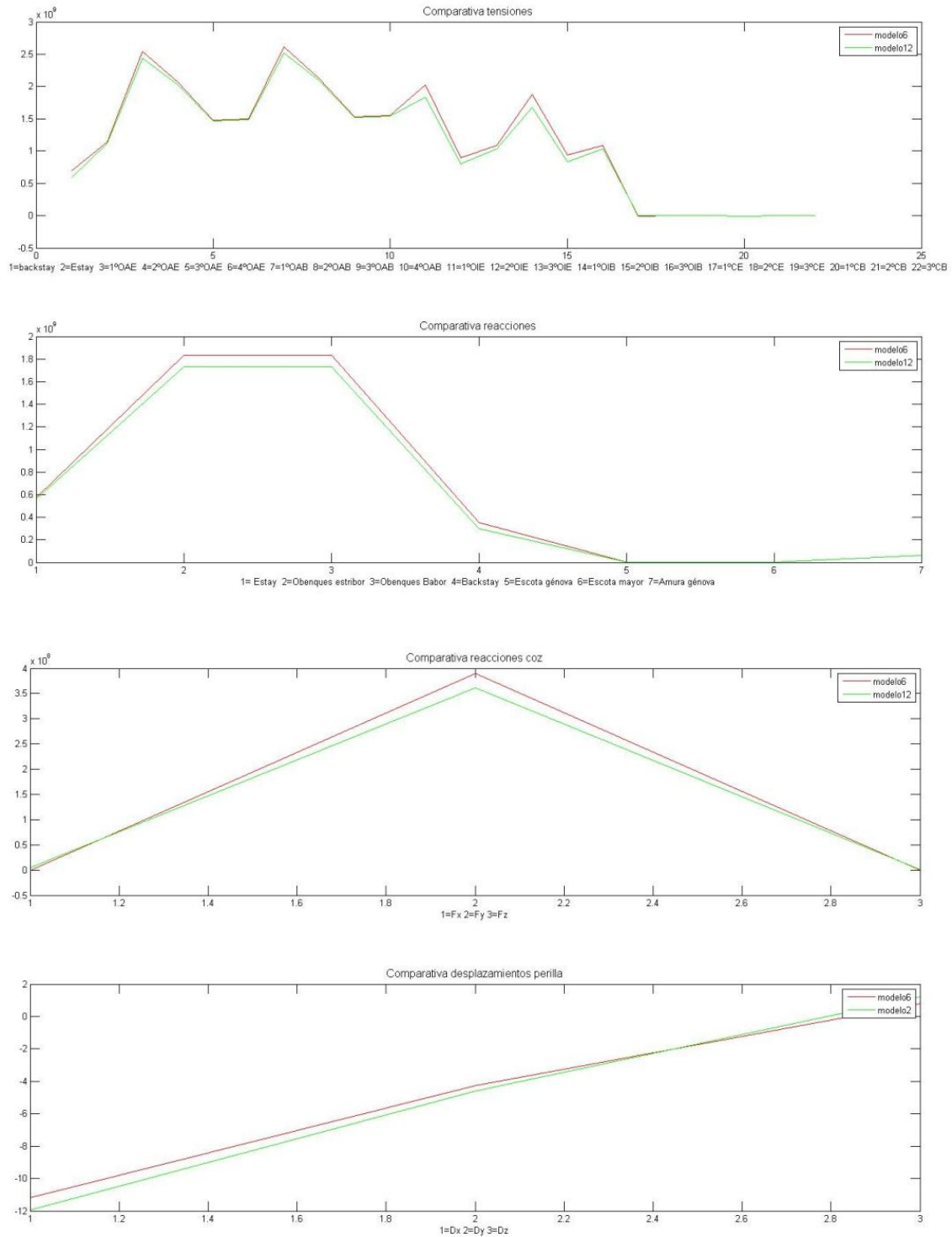


Figura 107: Comparativa M6 y M12

Se ve como al apoyar el palo sobre la quilla se obtienen beneficios tensionales, se reducen las tensiones en la jarcia y las reacciones. Descargándose la coza del mástil, la compresión sin fogonadura es la misma en la quilla porque al final siempre hay que apuntalar desde la cubierta a la quilla, se consigue incluso aumentar la deformación superior del palo, pudiéndose desplazar la perilla más a popa con las mismas cargas.

6.2. Modelo 13: Palo apoyado en la quilla con burdas

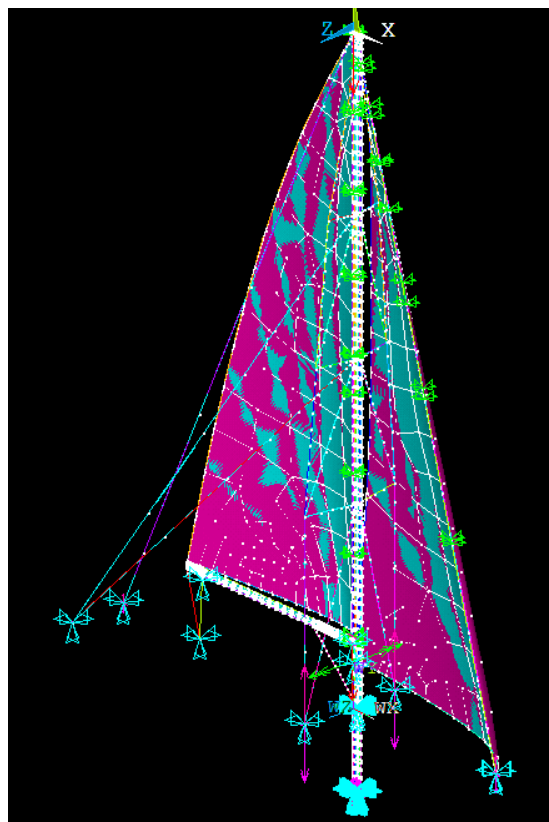


Figura 108: Mástil apoyado en quilla con burdas

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
13.493	4.221	1.09e9	6.54e9

Tabla 48: M13 Resultados

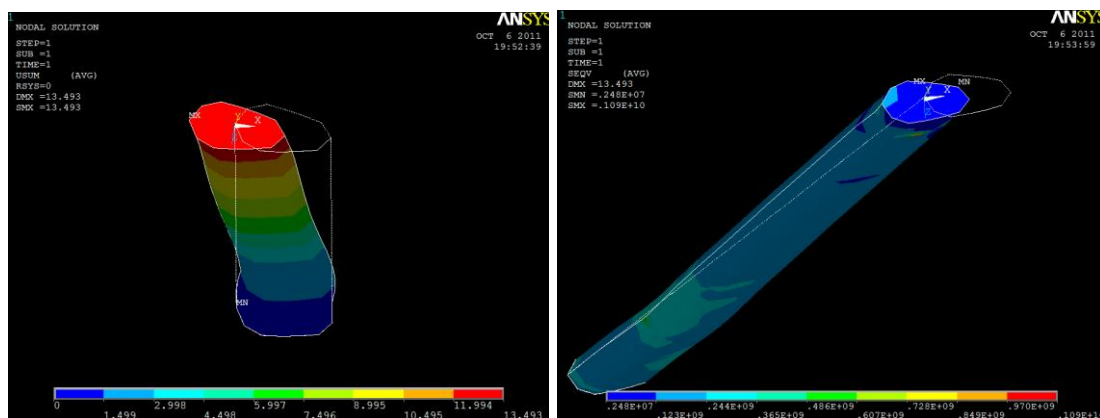


Figura 109: M12 Desplazamiento y tensiones

La deformación de la zona media ahora es más uniforme, con las burdas la tensión aumenta en el apoyo trasero de la fogonadura respecto al modelo anterior; las mayores tensiones, como en todos los modelos anteriores, se concentración en el arraigo del backstay y en el de los obenques altos.

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2151)	1,54E+08	-5,47E+08	-380	568016129,5
Obenques medios y altos estribor (2446)	-2,41E+07	-1,70E+09	1,24E+08	1708887241
Obenques medios y altos babor (2470)	-2,31E+07	-1,73E+09	-1,19E+08	1730625331
Backstay (2664)	-1,28E+08	-2,80E+08	90.562	307585507,3
Escota génova (2176)	-1,03E+06	5,98E+06	3,24E+05	6081507,628
Escota mayor (2640)	-2,69E+06	-1,62E+05	7,62E+04	2693548,306
Amura génova (1798)	3,13E+07	-1,05E+08	7,56E+05	109410200,3
Burdas	-1,78E+07	-2,04E+07	3.353.100	27290910,16

Tabla 49: M13 Reacciones

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	-47.368	-1002.7	-66.564
Esfuerzos en la base (kg)	4.1596e+006	3.6586e+008	1.6603e+005
Esfuerzos fogonadura (kg)	-15383550	0	-9.0132e+005
Desplazamientos perilla (cm)	-12.5113	-4.6695	1.0273

Tabla 50: M13 Cdg, reacciones en la cox y desplazamiento perilla

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) <2.1e11			
Backstay	0.61150E+09	3ºf. ob. int. estr.	0.10315E+10
Estay	0.11292E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.16972E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.24208E+10	2ºf. ob. int. bab.	0.86342E+09
2ºf. ob. alt. estr.	0.20366E+10	3ºf. ob. int. bab.	0.10357E+10
3ºf. ob. alt. estr.	0.14769E+10	1ºCruceta estr.	-0.43720E+07
4ºf. ob. alt. estr.	0.14984E+10	2ºCruceta estr.	-0.15277E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.25081E+10	3ºCruceta estr.	-0.21267E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.20604E+10	1ºCruceta bab.	-0.47230E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.14984E+10	2ºCruceta bab.	-0.15338E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.15203E+10	3ºCruceta bab.	-0.21577E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.17762E+10	Burdas altas	0.54084E+07
2ºf. ob. int. estr.	0.74290E+09	Burdas bajas	0.48912E+08

Tabla 51: M13 Esfuerzos axiales jarcia

Conclusiones

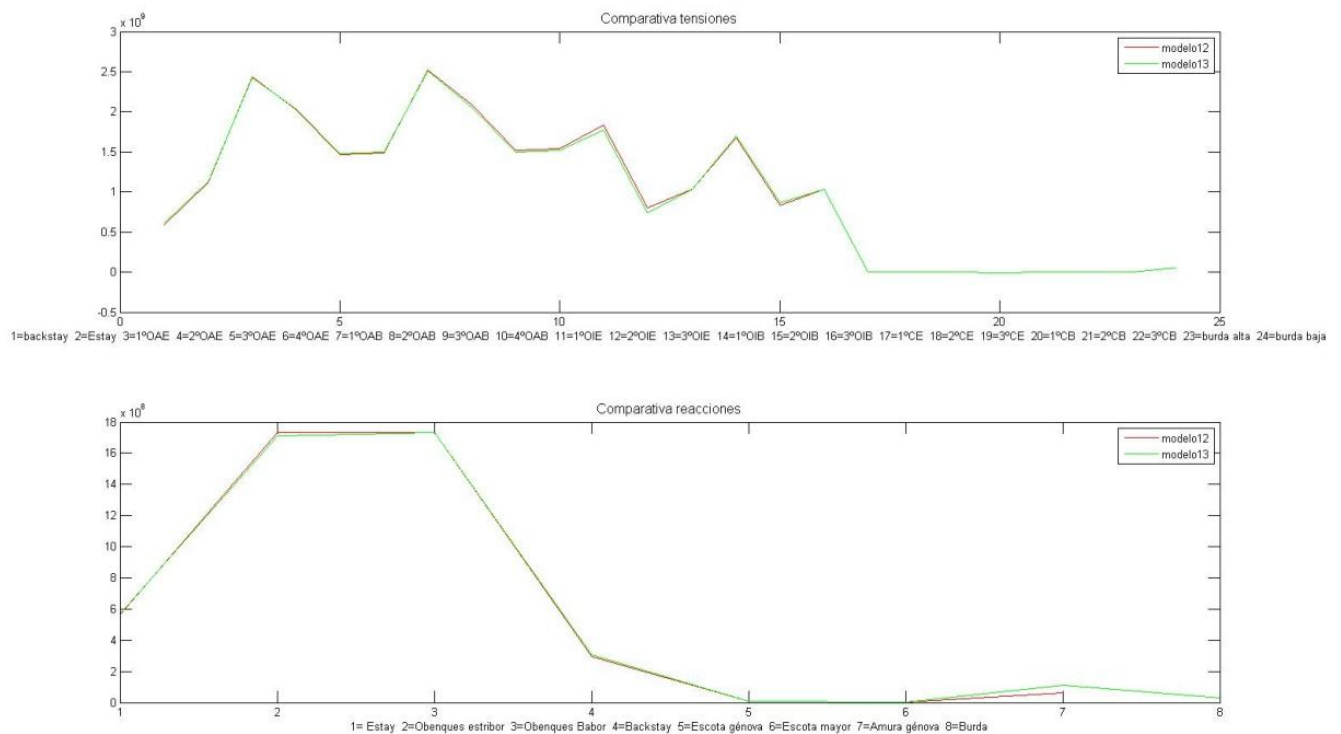


Figura 110: Comparativa esfuerzos M12 y M13

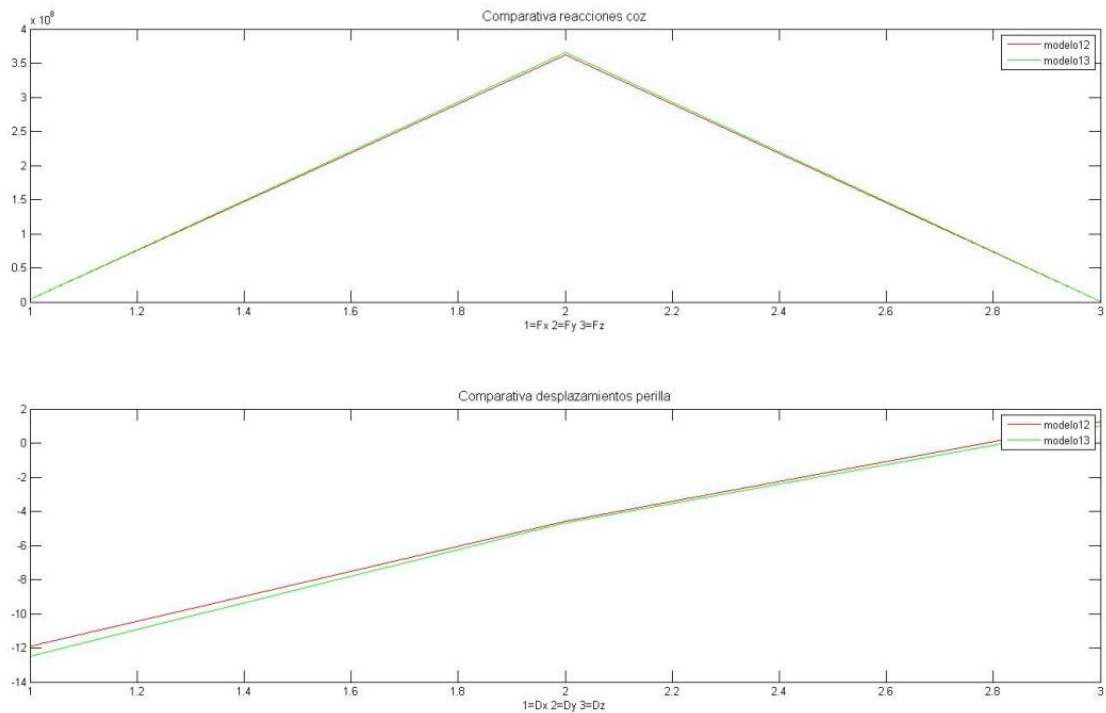


Figura 111: Comparativa deslizamientos M12 y M13

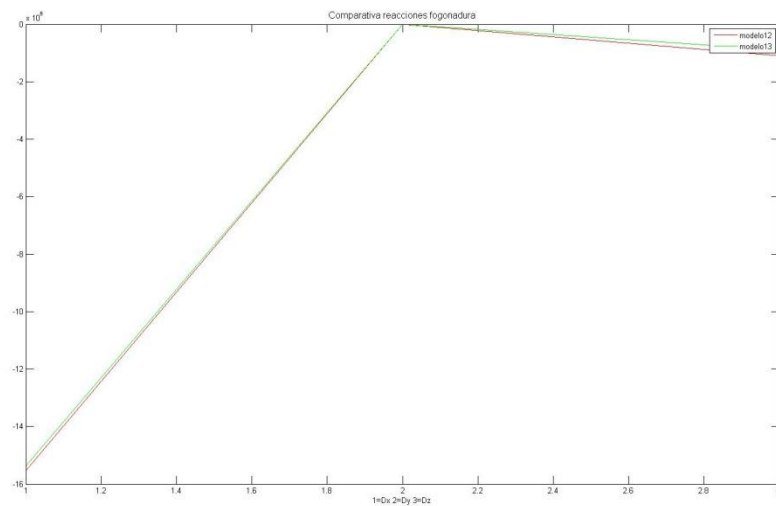


Figura 112: Comparativa reacciones fognadura M12 y M13

Las reacciones en la cox son prácticamente idénticas pero un poquito mayores en el modelo 13, así como el desplazamiento de la perilla. Respecto a las tensiones y reacciones son ligeramente inferiores en el modelo 13, por lo que podemos inclinarnos, frente al 12, por el modelo 13.

6.3.Conclusiones

Los cuatro modelos representativos con los que se continuará el estudio son:

Para mástil apoyado en la cubierta:

- Modelo 6, mástil simple con placa en perilla
- Modelo 11, es el modelo 6 con la incorporación de burdas altas y bajas

Para el mástil apoyado en la quilla:

- Modelo 12, mástil simple con placa en perilla y apoyado en la quilla
- Modelo 13, tenemos el modelo 11 pero apoyado en la quilla

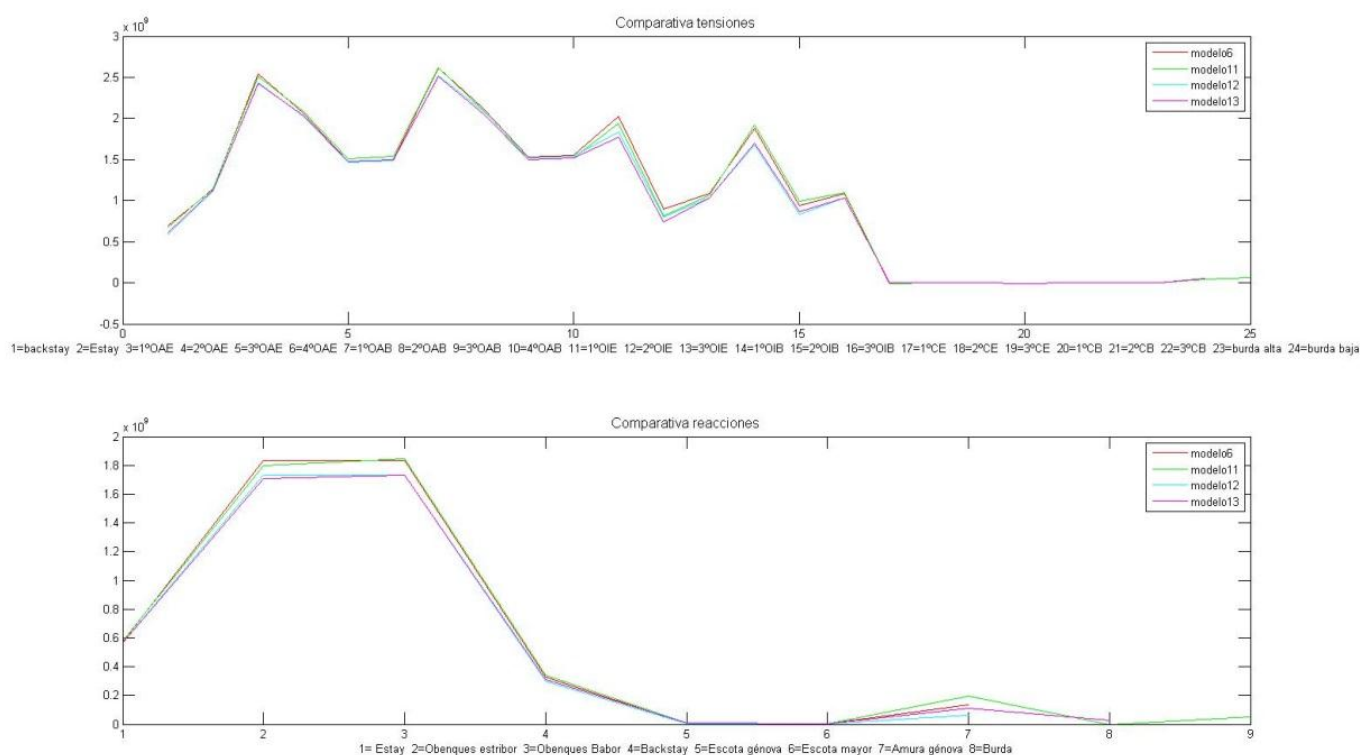


Figura 113: Comparativa tensiones M6, M11, M12 y M13

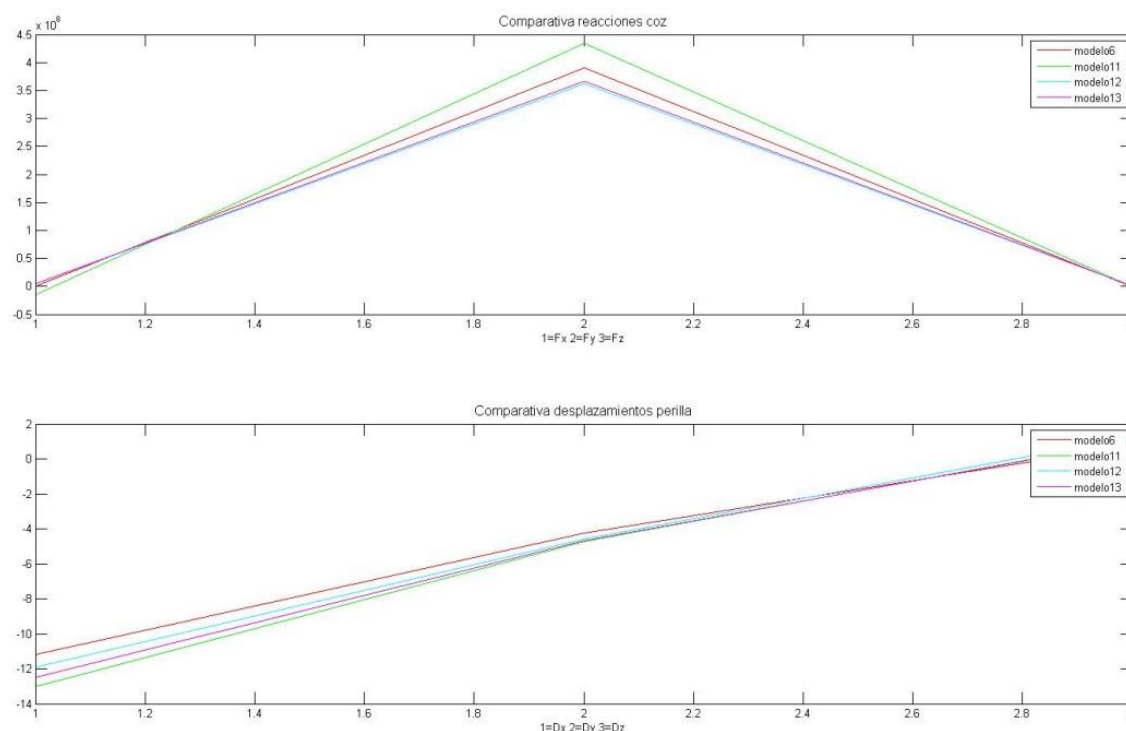


Figura 114: Comparativa desplazamiento M6, M11, M12 y M13

En la comparativa de los 4 modelos se deduce que el modelo que menores tensiones presenta es el modelo 13, seguido del modelo 12; por tanto la jarcia sufre menos con un palo apoyado en la quilla, eso se ve también en las reacciones, ya que están directamente relacionadas con las tensiones en la jarcia. Con un palo apoyado en la quilla se tienen menos esfuerzos en el casco y en la cubierta, sin contar con los nuevos esfuerzos en la fognadura.

En la base del palo se repiten las mejoras de los perfiles apoyados en la quilla; se reducen las compresiones en la coz en los dos modelos que se apoyan directamente en la quilla y, además, se consiguen unos desplazamientos de la perilla hacia popa mayores, salvo con el modelo 11 que es el que más desplazamiento consigue, con el modelo 13; todos tienen aproximadamente la misma caída lateral.

7. Cuarta fase: vientos portantes

Las fases anteriores eran para vientos no portantes, es decir, aquellos que no vienen por popa; los siguientes modelos son para los vientos no considerados anteriormente. Como la izada de spi es considerada como excepcional, se mantienen los ajustes de la jarcia anteriores, a excepción de las burdas y el backstay pueden ajustarse para cada ocasión. Las contras del tangón se simulan como un apoyo y para simular la tensión del amantillo le introducimos una pretensión. El puño de babor esta también sujeto por un apoyo, y en el penol del tangón habrá una fuerza en 'x' de 1e6kg.

7.1.Modelo 14: mástil simple con backstay cazado

Partiendo del modelo 6, se cambia la vela de proa (la génova por el spi).

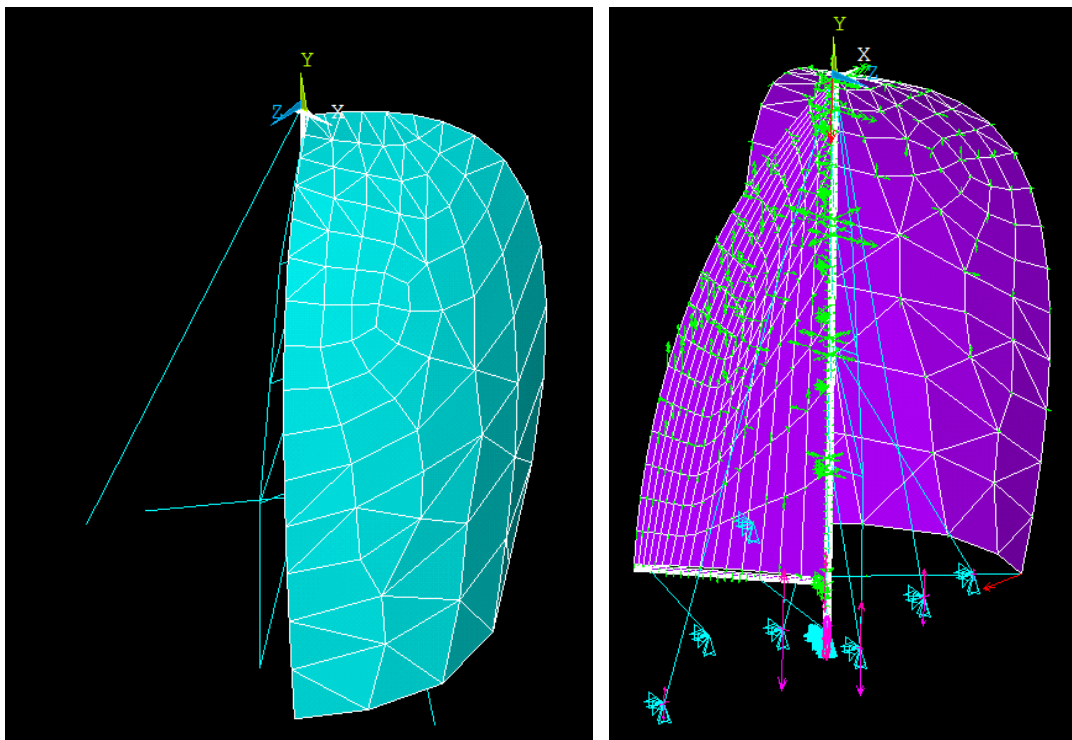


Figura 115: Mástil con spi

Elemento	Tipo elemento	Constantes reales										Material			
		Nº	Espesor (cm)	Preten	Área (cm ²)	Izz (cm ⁴)	Iyy (cm ⁴)	TKZ (cm)	TKY (cm)	IXX (cm ⁴)	φ (cm)	Nº	Módulo Elástico (kg cm/s ² cm ²)	Densidad (kg/cm ³)	Tipo
Mástil	Shell63	1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Crucetas	Beam4	3	-	-	36.7	328	37.51	3.5	10.5	150.1	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Botavara	Shell63	2	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Obenques altos	Beam4	11	-	0.0125	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Obenques intermedios	Beam4	8	-	0.0125	0.283	0.0108	0.0108	0.6	0.6	0.0432	6	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Estay	Beam4	7	-	0.0061	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Backstay	Beam4	12	-	0.0081	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Mayor	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2.3e11	0.00138	Carbono
Génova	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Spi	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Tangón	Pipe16	10	0.3	-	-	-	-	-	-	-	20	1	7e10	0.00267	Aluminio
Drizas y amantillos	Beam4	6	-	0.001	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Escotas	Beam4	8	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	AISI 316
Drizas	Beam4	13	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Pajarín	Beam4	14	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Babystay	Beam4	15	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero
Burdas	Beam4	16	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero

Tabla 52: M14 características

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²) < 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
17.847	7	1.01e9	1.65e9

Tabla 53: M14 Resultados

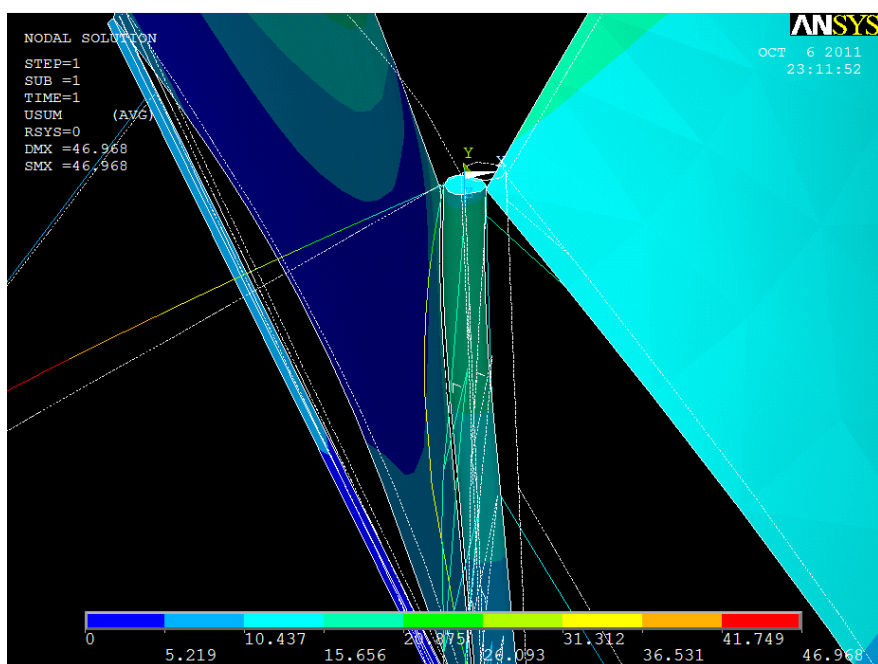


Figura 116: M14 desplazamiento

Se aprecia que el palo, debido a la pretensión del backstay esta deformado hacia popa, pero de forma bastante uniforme, sin mostrar barriga debido a la tensión del spi; la máxima deformación se encuentra un poco por debajo del arraigo del backstay. No es una forma válida, ya que con portantes el mástil debe ir lo más recto posible.

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (2310)	1,97E+08	-6,99E+08	-62.179	726664624,4
Obenques medios y altos estribor (2259)	-2,28E+07	-1,18E+09	1,17E+08	1182756921
Obenques medios y altos babor (2273)	-3,10E+07	-1,51E+09	-1,60E+08	1516435579
Backstay (2373)	-1,87E+08	-4,09E+08	61.193	449763995,7
Escota mayor (2469)	-2,40E+05	-6944,6	3,20E+05	399820,3165

Tabla 54: M14 Reacciones

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	271.43	-793.94	-77.397
Esfuerzos en la base (kg)	-1623075	3.5597e+008	-1.8496e+006
Desplazamientos perilla (cm)	-12.6134	-2.2883	8.1788

Tabla 55: M14 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla

Los desplazamientos son excesivos hacia popa ya que lo buscado es una rectitud en el mástil, además, se incrementa la torsión del palo en este viento con el backstay cazado.

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) <2.1e11			
Backstay	0.89417E+09	2ºf. ob. int. estr.	0.84744E+09
Estay	0.14447E+10	3ºf. ob. int. estr.	0.91899E+09
1ºf. ob. alt. estr.	0.14253E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.22825E+10
2ºf. ob. alt. estr.	0.98213E+09	2ºf. ob. int. bab.	0.11915E+10
3ºf. ob. alt. estr.	0.48355E+09	3ºf. ob. int. bab.	0.11326E+10
4ºf. ob. alt. estr.	0.49095E+09	1ºCruceta estr.	-0.34197E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.17546E+10	2ºCruceta estr.	-0.13611E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.51586E+09	3ºCruceta estr.	-0.69743E+06
3ºf. ob. alt. bab.	0.11305E+10	1ºCruceta bab.	-0.45156E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.52366E+09	2ºCruceta bab.	-0.16774E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.16787E+10	3ºCruceta bab.	-0.74372E+06

Tabla 56: M14 Esfuerzos axiales jarcia

7.2. Modelo 15: Mástil simple con perfil recto

Para mantener la perilla recta, se reduce la pretensión en el backstay hasta $\varepsilon = 0.004$

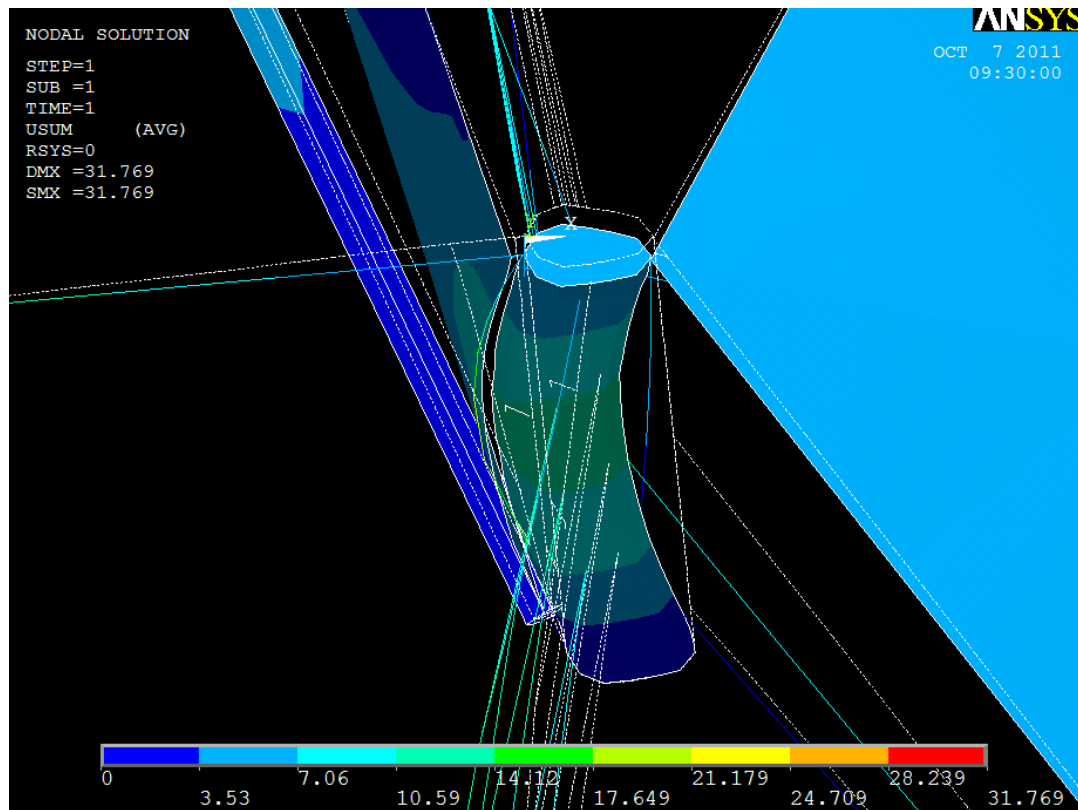


Figura 117: M15 deformación

Viendo como la perilla ya no se nos desplaza hacia popa pero, debido a la pretensión de obenques altos e intermedios, la última zona del mástil se invierte al soltar tanto el backstay.

Una posible solución sería amollar la jarcia, pero al no contemplar la continua adaptación de los tensores hay que buscar otra solución.

El modelo, como se diría en el argot mariner, esta aparejado con el spi a tope, pero en un aparejo fraccionado sale justo encima del estay, por tanto, se bajará el puño de driza hasta el estay y se verá si queda solucionada la curvatura invertida, modelo 20.

La inversión se ha mejorado manteniendo una pretensión de 0.004

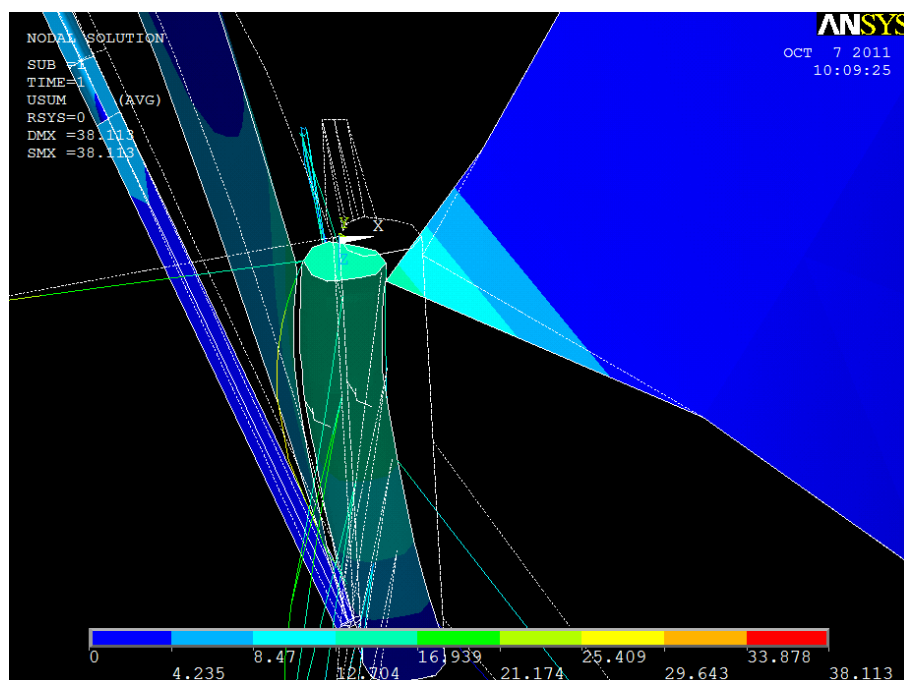


Figura 118: M15 desplazamiento fraccionado

7.3.Modelo 16: Mástil apoyado en la quilla con vientos portantes

La primera implementación realizada con $\varepsilon = 0.002$

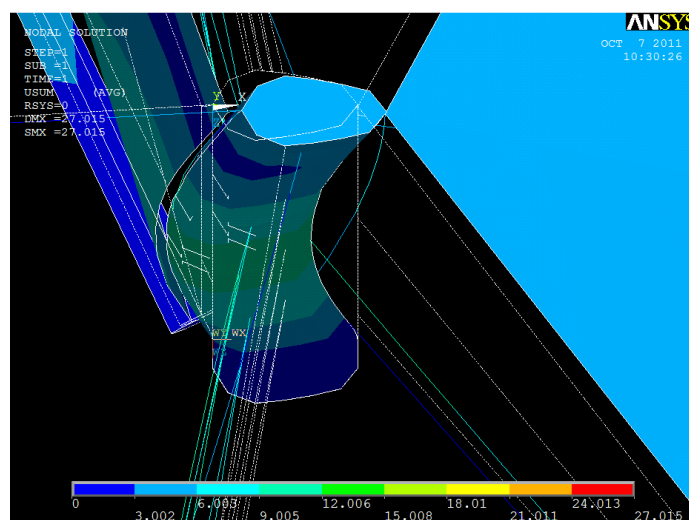


Figura 119: M16 desplazamientos

Observar como ahora la parte inferior no se desplaza gracias a la fogonadura, pero sigue obteniéndose una curvatura excesiva en el palo y, sobre la segunda cruceta, la curva es invertida. La perilla se encuentra desplazada hacia proa, lo cual no se puede permitir.

Aumentando la pretensión del backstay hasta $\varepsilon = 0.006$

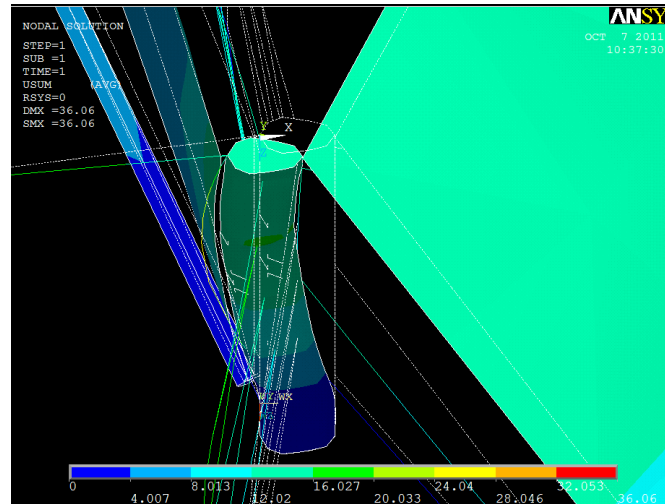


Figura 120: M16 desplazamientos con backstay cazado

7.4. Modelo 17: Babystay para palo apoyado en la quilla con portantes

En vista de los resultados, la pretensión de los obenques perjudica en exceso la curvatura del mástil; hay que probar con la colocación del babystay.

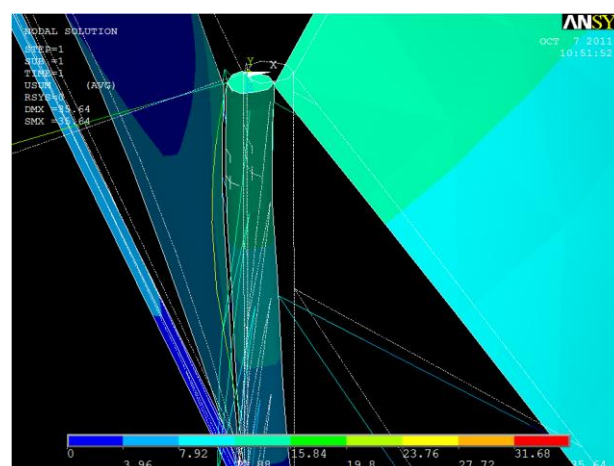


Figura 121: M17 desplazamientos

Con la incorporación del babystay se mejora la curvatura del palo notablemente, ahora, probando a dar un trimado, se aplica al babystay una pretensión de $\varepsilon = \frac{3}{883} = 0.0034$

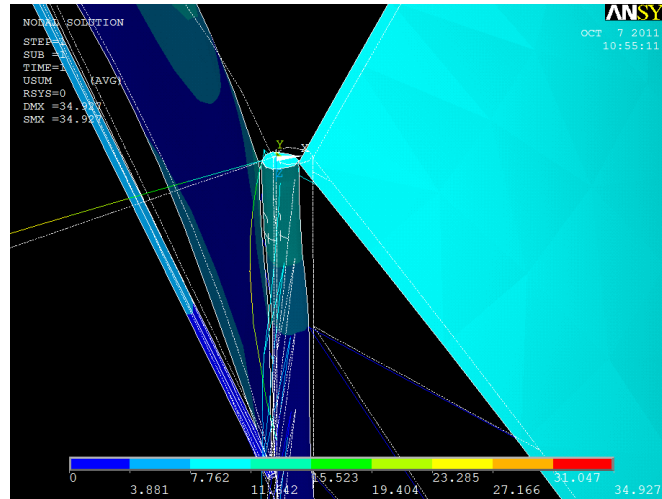


Figura 122: M17 desplazamientos con babystay pretensado

La deformación ha mejorado bastante, probando con spi fraccionado se verá la diferencia entre uno y otro.

Elemento	Tipo elemento	Constantes reales										Material			
		Nº	Espesor (cm)	Preten	Área (cm ²)	Izz (cm ⁴)	Iyy (cm ⁴)	TKZ (cm)	TKY (cm)	IXX (cm ⁴)	φ (cm)	Nº	Módulo Elástico (kg cm/s ² cm ²)	Densidad (kg/cm ³)	Tipo
Mástil	Shell63	1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Crucetas	Beam4	3	-	-	36.7	328	37.51	3.5	10.5	150.1	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Botavara	Shell63	2	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Obenques altos	Beam4	11	-	0.0125	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Obenques intermedios	Beam4	8	-	0.0125	0.283	0.0108	0.0108	0.6	0.6	0.0432	6	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Estay	Beam4	7	-	0.0061	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Backstay	Beam4	12	-	0.0081	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Mayor	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2.3e11	0.00138	Carbono
Génova	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Spi	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Tangón	Pipe16	10	0.3	-	-	-	-	-	-	-	20	1	7e10	0.00267	Aluminio
Drizas y amantillos	Beam4	6	-	0.001	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Escotas	Beam4	8	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	AISI 316
Drizas	Beam4	13	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Pajarín	Beam4	14	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Babystay	Beam4	15	-	0.0034	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero
Burdas	Beam4	16	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero

Tabla 57: M17 características

7.5. Modelo 18: Spi fraccionado

Simulando el spi para el aparejo fraccionado, la driza del spi sale desde el estay. Amollando el backstay hasta $\varepsilon = 0.005$

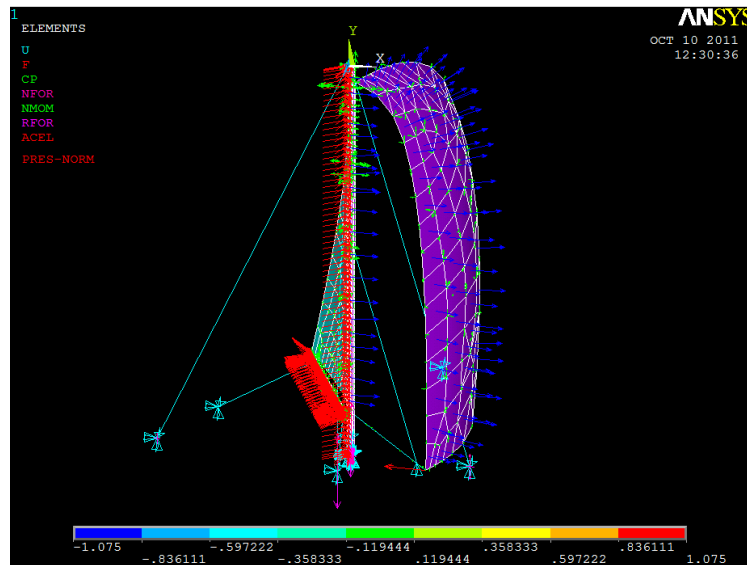


Figura 123: Spi fraccionado

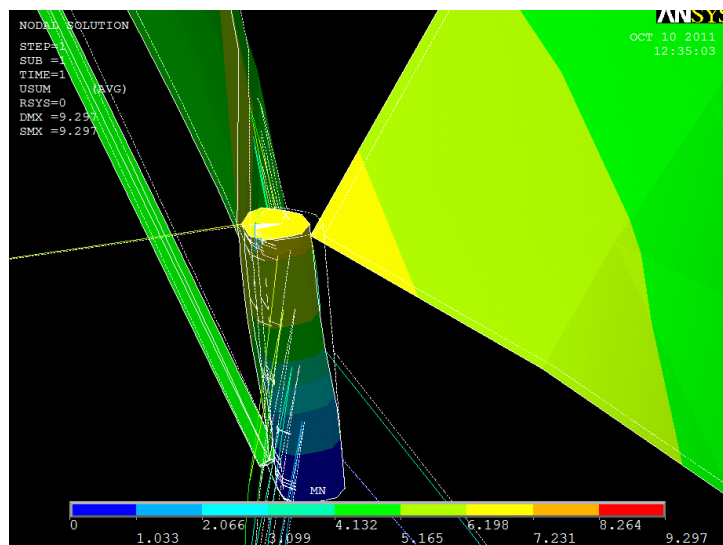


Figura 124: M18 desplazamiento con 0.005 de backstay

Con la reducción de pretensión se observa que con spi fraccionado el perfil pinta mucho mejor, sin embargo el último tramo está excesivamente recto y podría dar lugar a inversión, para subsanarlo se puede cazar el backstay hasta $\varepsilon = 0.006$

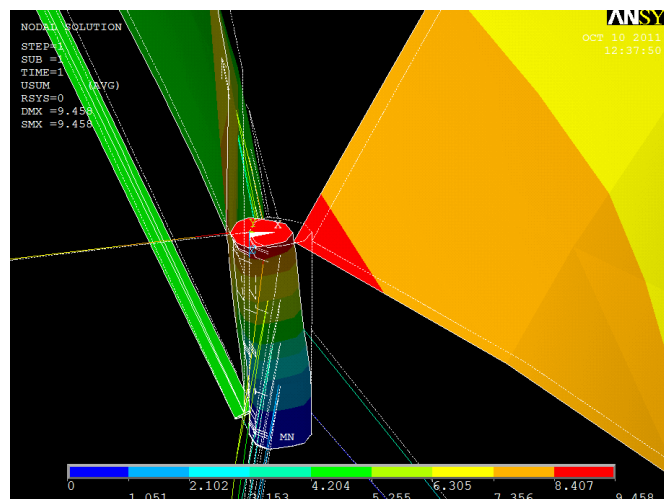


Figura 125: Desplazamiento con backstay al 0.006

Ahora la deformación del perfil es más parecida a la realidad, tomando por buenos los valores de este modelo para obtener las solicitaciones de la estructura.

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²)< 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
9.128	9.458	1.12e9	6.89e7

Tabla 58: M18 Resultados

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (947)	1,44E+08	-5,11E+08	-22.982	531083724,2
Obenques medios y altos estribor (960)	-2,70E-01	-1,86E+09	1,39E+08	1866974143
Obenques medios y altos babor (973)	-2,69E+07	-1,86E+09	-1,39E+08	1865749802
Backstay (936)	-8,52E+07	-1,93E+08	84.507	210587413,5
Escota spi (2824)	-5,23E+05	-6,09E+05	-9,36E+05	1233095,341
Escota mayor (3072)	-1,61E+05	-239,8	2,53E+05	299950,9785

Tabla 59: M18 Reacciones

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	271.43	-793.94	-77.397
Esfuerzos en la base (kg)	-408400	3.7631e+008	4.9068e+004
Desplazamientos perilla (cm)	-8.0534	-4.0651	0.0390

Tabla 60: M18 CdG, reacciones en la cox y desplazamiento perilla

Se consigue mantener la perilla ahora lo más recta posible, sobretudo sin tocar la pretensión de los obenques y de estay que se suponen fijas.

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) <2.1e11			
Backstay	0.41866E+09	2ºf. ob. int. estr.	0.94865E+09
Estay	0.10558E+10	3ºf. ob. int. estr.	0.11151E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.26204E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.19881E+10
2ºf. ob. alt. estr.	0.21298E+10	2ºf. ob. int. bab.	0.93946E+09
3ºf. ob. alt. estr.	0.15268E+10	3ºf. ob. int. bab.	0.11169E+10
4ºf. ob. alt. estr.	0.15490E+10	1ºCruceta estr.	-0.50423E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.26200E+10	2ºCruceta estr.	-0.16383E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.21343E+10	3ºCruceta estr.	-0.22008E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.15303E+10	1ºCruceta bab.	-0.50229E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.15526E+10	2ºCruceta bab.	-0.16409E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.19923E+10	3ºCruceta bab.	-0.22059E+07

Tabla 61: M18 Esfuerzos axiales jarcia

7.6.Modelo 19: Spi fraccionado apoyado en la quilla

Como en los modelos anteriores, simulando ahora el perfil apoyado en la quilla con la fognadura de cubierta, se comparará así la diferencia entre unos modelos y otros.

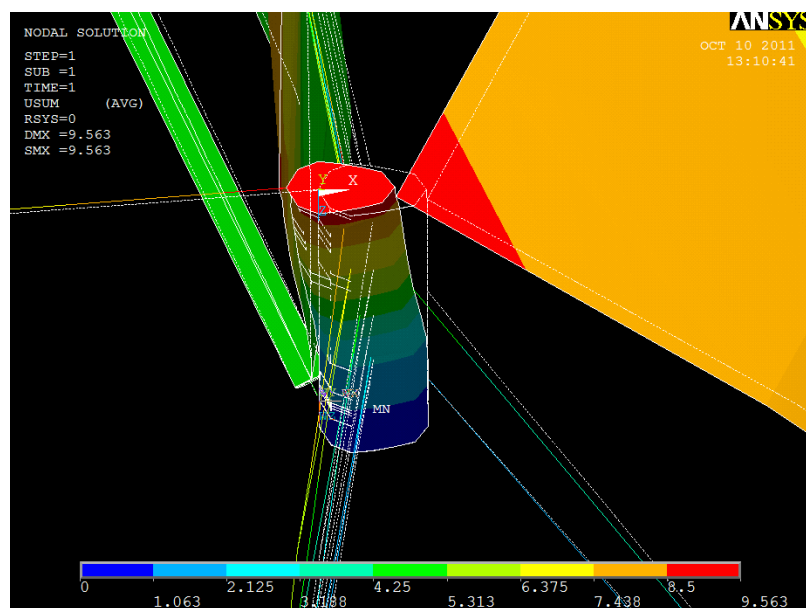


Figura 126: Spi fraccionado apoyado en la quilla

La deformada es muy similar, la diferencia es la rectitud en la zona baja, en la que, con fognadura, es más amplia.

Desplazamientos (cm)		Tensiones (kg cm /s ² cm ²)< 7e10	
Perilla mástil	Botavara	Mástil	Botavara
9.173	9.563	1.11e9	8.43e7

Tabla 62: M19 Resultados

Reacciones (kg)	Fx	Fy	Fz	modulo
Estay (947)	1,37E+08	-4,85E+08	-24.236	504072941,3
Obenques medios y altos estribor (960)	-2,46E+07	-1,77E+09	1,26E+08	1774483679
Obenques medios y altos babor (973)	-2,40E+07	-1,74E+09	-1,23E+08	1744539924
Backstay (936)	-7,90E+07	-1,79E+08	79.623	195202659,7
Escota spi (2824)	-5,21E+05	-5,71E+05	-9,11E+05	1195052,522
Escota mayor (3072)	-1,60E+05	-235,76	2,51E+05	297726,0151

Tabla 63: M19 Reacciones

	x	y	z
Centro de gravedad (cm)	271.43	-793.94	-77.397
Esfuerzos en la base (kg)	4.6711e+005	3.5016e+008	9.6037e+004
Desplazamientos perilla (cm)	-7.8638	-4.4560	-0.7422
Esfuerzos fogonadura	-1232950	0	-2.7599e+005

Tabla 64: M19 Cdg, reacciones en la coz y desplazamiento perilla

Tensiones (kg cm /s ² cm ²) <2.1e11			
Backstay	0.38807E+09	2ºf. ob. int. estr.	0.86289E+09
Estay	0.10021E+10	3ºf. ob. int. estr.	0.10649E+10
1ºf. ob. alt. estr.	0.25342E+10	1ºf. ob. int. bab.	0.17710E+10
2ºf. ob. alt. estr.	0.20886E+10	2ºf. ob. int. bab.	0.81513E+09
3ºf. ob. alt. estr.	0.15127E+10	3ºf. ob. int. bab.	0.10538E+10
4ºf. ob. alt. estr.	0.15348E+10	1ºCruceta estr.	-0.47642E+07
1ºf. ob. alt. bab.	0.24984E+10	2ºCruceta estr.	-0.15643E+07
2ºf. ob. alt. bab.	0.20779E+10	3ºCruceta estr.	-0.21807E+07
3ºf. ob. alt. bab.	0.15080E+10	1ºCruceta bab.	-0.46237E+07
4ºf. ob. alt. bab.	0.15300E+10	2ºCruceta bab.	-0.15481E+07
1ºf. ob. int. estr.	0.18142E+10	3ºCruceta bab.	-0.21738E+07

Tabla 65: M19 Esfuerzos axiales jarcia

Conclusiones

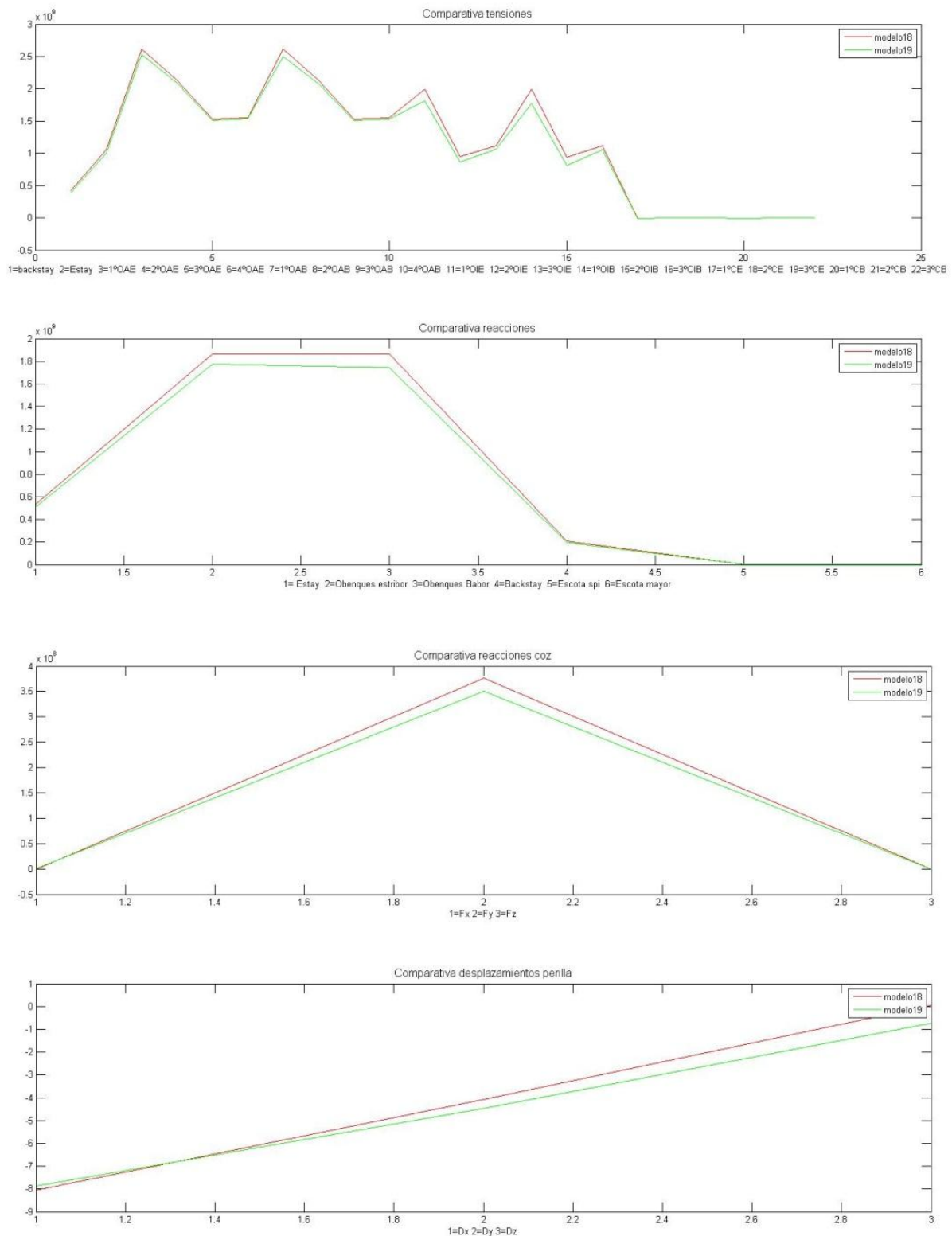


Figura 127: Comparativa M20 y M21

Las tensiones y reacciones, como ha venido pasando en todos los modelos de apoyo en la quilla, son menores que las de los perfiles apoyados

en la cubierta. Como desventaja se ve que la torsión superior del mástil es mayor debido a que tiene algo más de caída lateral.

7.7.Modelo 20: Portante con burdas apoyado en cubierta

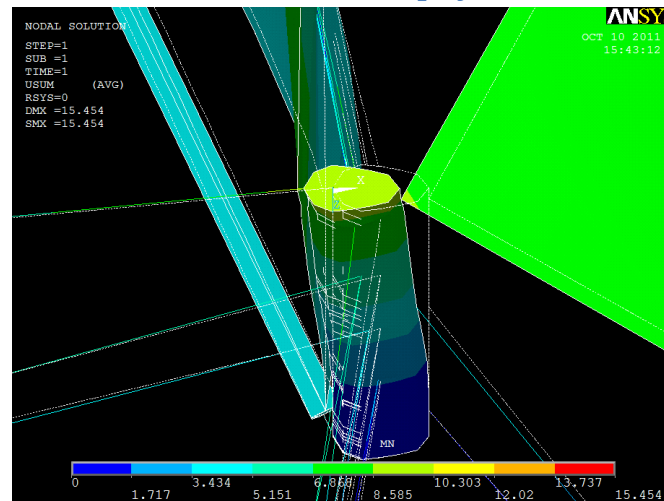


Figura 128: M20 desplazamiento

7.8.Modelo 21: Portante con burdas apoyado en la quilla

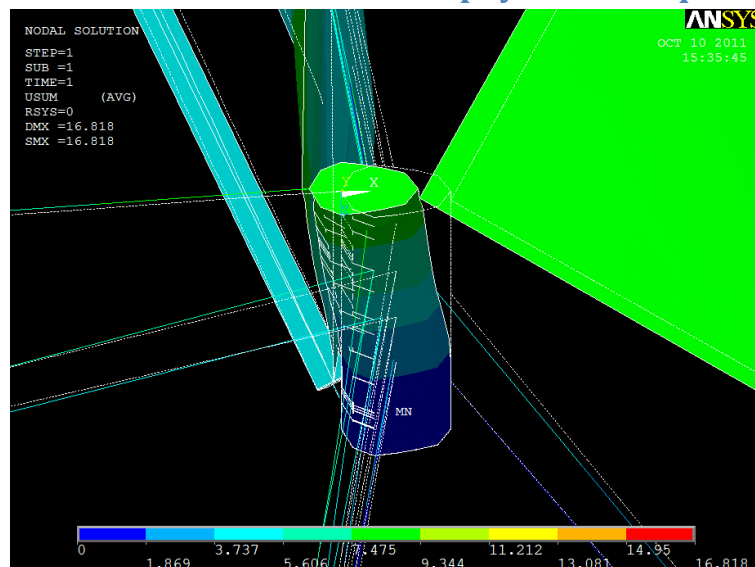


Figura 129: M21 desplazamiento

El perfil, tanto en el modelo 20 como el 21, no tiene una deformación muy diferenciada del simple sin burdas, la ventaja es que se reduce la tensión en el backstay, pero, como no es crítica, no es preciso implantar las burdas.

7.9.Conclusiones

Comparando los modelos que se adoptan como válidos: modelo 6, modelo 12, modelo 11, modelo 13, modelo 18 y modelo 19 se escogerá el más solicitado para estudiar detalladamente las salidas de driza, los arraigos, los apoyos de cruceta, etc.

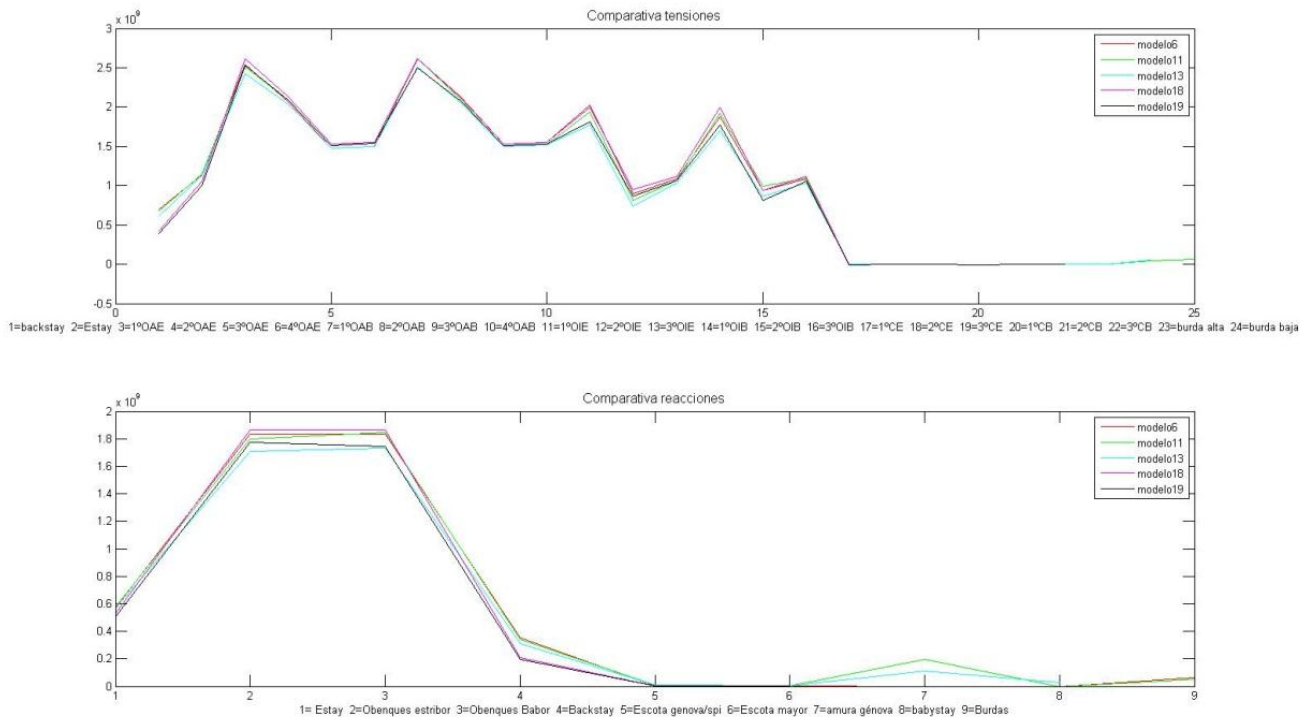


Figura 130: Comparativa global tensiones

Los vientos portantes cargan la estructura con magnitudes similares a las del resto de modelos, luego la comparativa puede resultar de interés:

- El modelo 11 es el que menores tensiones en la jarcia tiene, con unas reacciones también reducidas
- El modelo 19 tampoco se encuentra cargado excesivamente frente al resto de modelos
- El modelo 13 fluctúa entre los más bajos y valores medios
- El modelo 18 y 6 tienen los máximos en casi todo el intervalo.

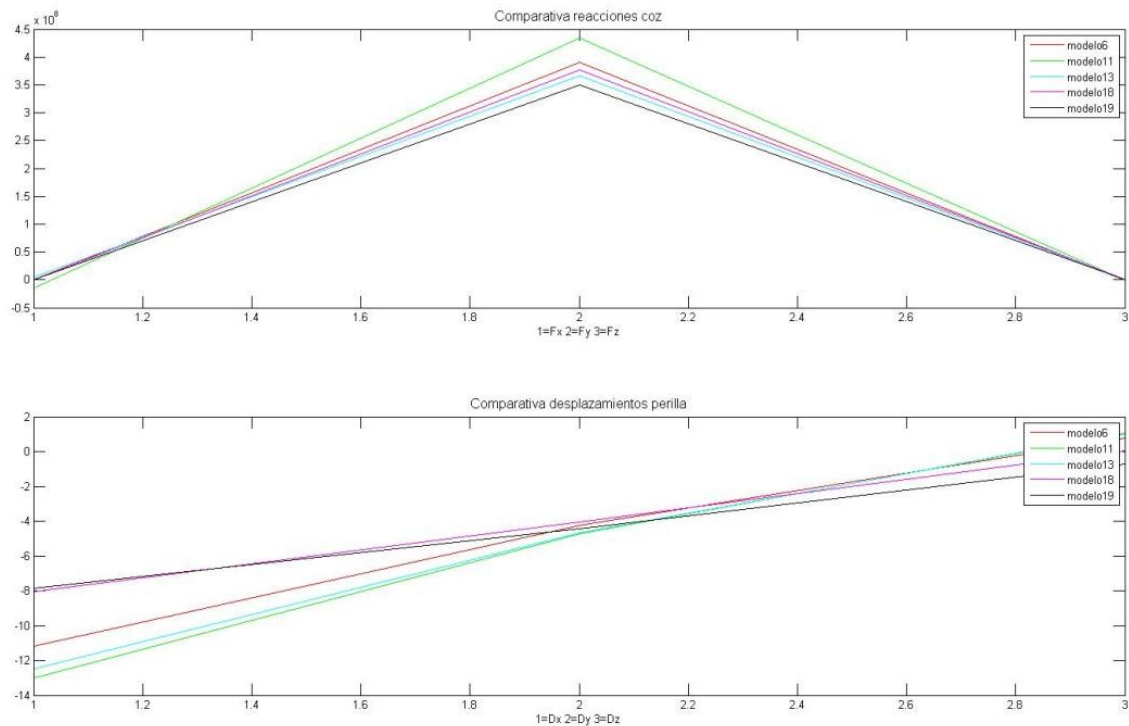


Figura 131: Comparativa global desplazamientos

- El modelo 19 es el que menores reacciones en la cox tiene, esto es debido también a que el spi “vuela” y ayuda a rebajar las fuerzas de compresión.
- El modelo 11 es el que mejores deformaciones consigue en la perilla, pero aumentan mucho las reacciones en la cox.
- El modelo 13 presenta un valor bajo para las reacciones en la cox y altos desplazamientos.
- El modelo 18 es, junto al 19, muy rígido y poco flexible y tiene unas reacciones elevadas.

A la vista de los modelos, la combinación más adecuada parece ser la de un mástil con burdas y apoyado en la quilla, modelo 13. Sin descartar los otros tres que hemos ido comprobando, el 6, el 11 y el 12

8. Quinta fase: Estudio detallado de partes críticas

En esta parte de la memoria se intentará analizar en profundidad las zonas críticas de la jarcia a partir de los valores obtenidos en el modelo 6, que es de los más solicitados dentro de los que se han considerado válidos.

8.1. Arraigos obenques altos y backstay

Exportando las solicitaciones del modelo 6 a la sección de mástil superior se procederá al estudio donde descansa el arraigo de los obenques altos, del backstay, del estay y de las salidas de drizas.



Se llevarán las tensiones de la jarcia a los puntos correspondientes y los momentos en los nodos a nuestra sección.

Las tensiones se dividirán en las componentes vertical y horizontal que se aplica en los arraigos.

Figura 132: Arraigo obenques

Problemas modelo

Se tiene que sujetar la estructura para que Ansys considere que no tiene demasiados grados de libertad, por tanto, es preferible modelar toda la jarcia y con la función entities escoger el perfil superior para hacerle un estudio más minucioso.

8.2. Modelo 22: Estudio zona de la perilla

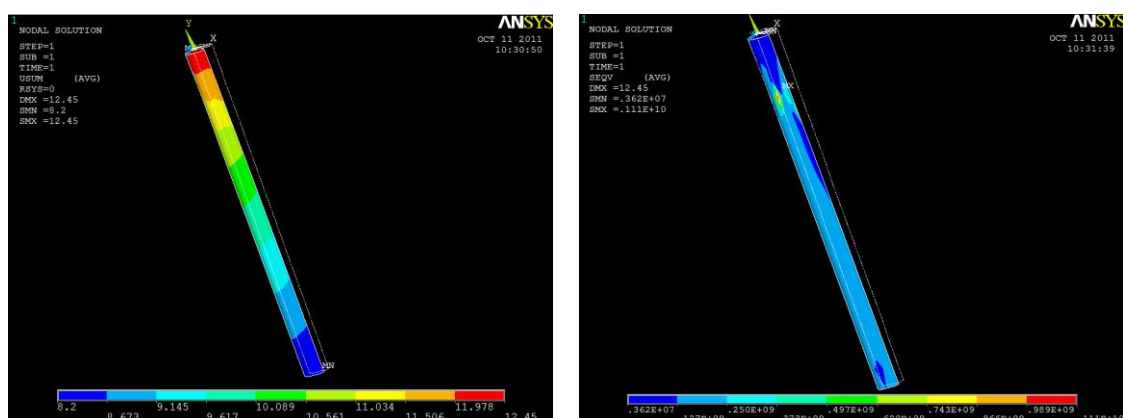


Figura 133: Valores perilla

Como en todos los modelos, la zona más solicitada es la del arraigo de los obenques altos; con los orificios de drizas se prestará especial cuidado en cómo se reparten las tensiones.

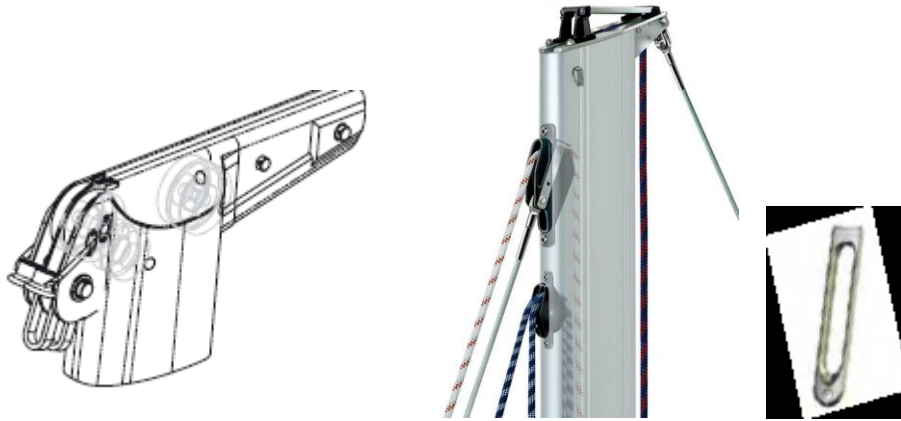


Figura 134: Salidas drizas real

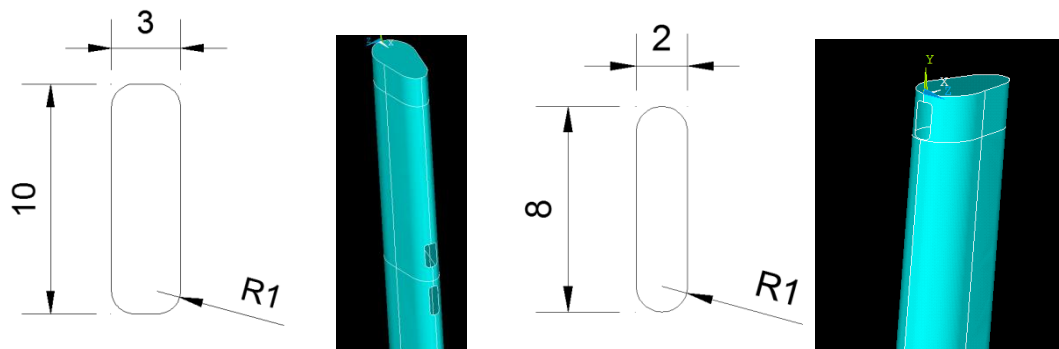
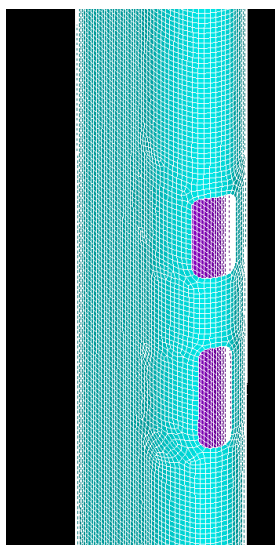


Figura 135: Dimensiones salida génova (izq.) y mayor y spi (dcha.)



Para el mallado se realizará un mallado selectivo para aumentar el número de nodos próximos a los orificios y menos preciso para el resto del perfil y así agilizar el cálculo.

Figura 136: Mallado zonas críticas

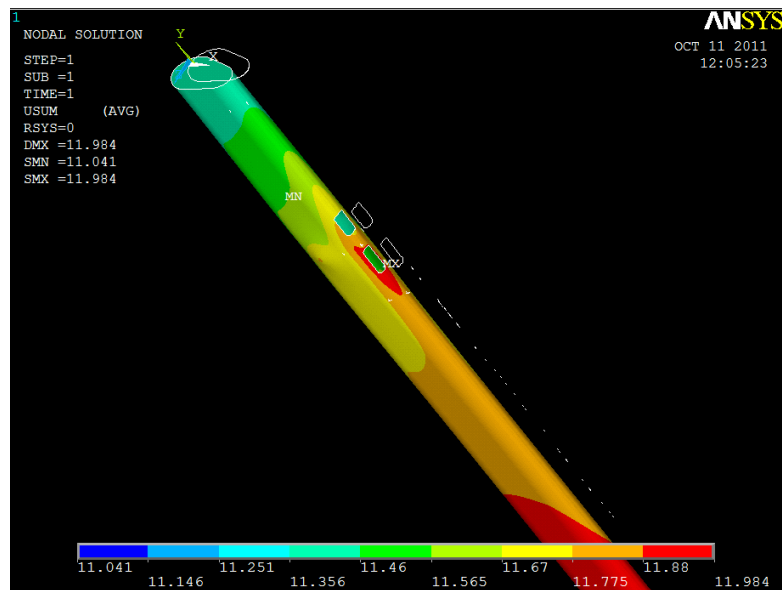


Figura 137: M22 desplazamiento

Siguen siendo desplazamientos asumibles por la geometría

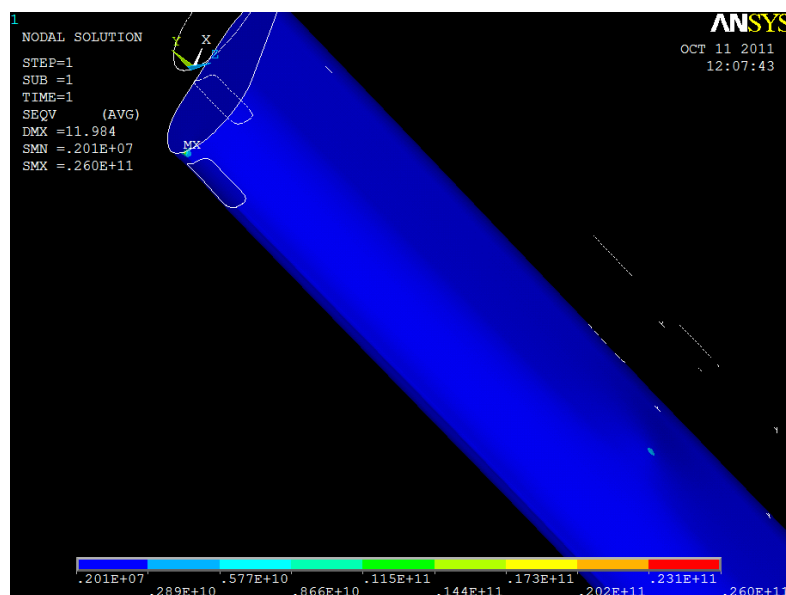


Figura 138: M22 tensiones

Las mayores tensiones siguen dándose en el arraigo del backstay y, en menor magnitud, en los arraigos de los obenques; las salidas no parecen suponer una concentración crítica de esfuerzos ya que el perfil es capaz de soportar todas las solicitaciones.

Elemento	Tipo elemento	Constantes reales										Material			
		Nº	Espesor (cm)	Preten	Área (cm ²)	Izz (cm ⁴)	Iyy (cm ⁴)	TKZ (cm)	TKY (cm)	IXX (cm ⁴)	φ (cm)	Nº	Módulo Elástico (kg cm/s ² cm ²)	Densidad (kg/cm ³)	Tipo
Mástil	Shell63	1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Crucetas	Beam4	3	-	-	36.7	328	37.51	3.5	10.5	150.1	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Botavara	Shell63	2	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7e10	0.00267	Aluminio
Obenques altos	Beam4	11	-	0.0125	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Obenques intermedios	Beam4	8	-	0.0125	0.283	0.0108	0.0108	0.6	0.6	0.0432	6	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Estay	Beam4	7	-	0.0061	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero AISI 316
Backstay	Beam4	12	-	0.0081	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero
Mayor	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2.3e11	0.00138	Carbono
Génova	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Spi	Shell181	9	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2.3e11	0.00138	Carbono
Tangón	Pipe16	10	0.3	-	-	-	-	-	-	-	20	1	7e10	0.00267	Aluminio
Amantillos	Beam4	6	-	0.001	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero
Escotas	Beam4	8	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero
Drizas	Beam4	13	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero
Pajarín	Beam4	14	-	0.003	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero
Babystay	Beam4	15	-	0.0034	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero
Burdas	Beam4	16	-	-	0.503	0.0341	0.0341	0.8	0.8	0.1365	8	4	2.1e11	0.0079	Acero
Refuerzo backstay	Beam4	17	-	-	0.283	0.0108	0.0108	0.6	0.6	0.0432	6	4	2.1e11	0.0079	Acero
Refuerzo obenques	Beam4	18	-	-	0.283	0.0108	0.0108	0.6	0.6	0.0432	6	4	2.1e11	0.0079	Acero

Tabla 66: Características cuarta fase

8.3.Modelo 23: Refuerzo arraigo backstay

Para reducir la carga del arraigo del backstay, se traspa parte de la tensión al estay a través de una varilla.

Al colocarla sin pretensión se reduce un poco la tensión desde los 2.6×10^{10} hasta los 2.4×10^{10} ; introduciendo un ligero acortamiento en la varilla de $\varepsilon = 0.0125$ la tensión aumenta al incrementarse la carga de compresión, por tanto lo mejor es colocar una varilla sin pretensión a modo de apoyo para transmitir cargas y no para mayorarlas.

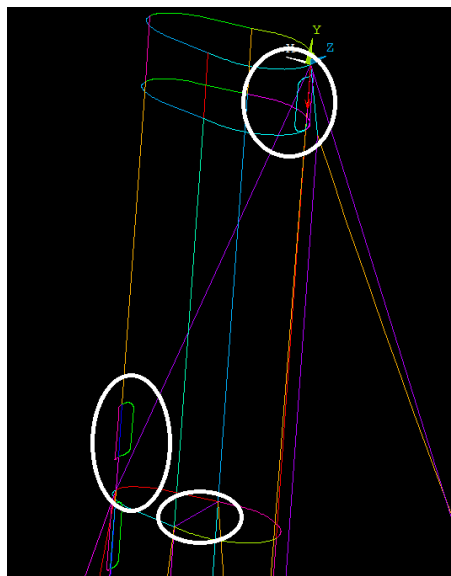


Figura 139: Refuerzos

8.4.Modelo 24: Refuerzo obenques altos

Igual que para el modelo 23, se instala una varilla entre los arraigos de los obenques altos para evitar un desgarro del perfil y reducir sus tensiones.

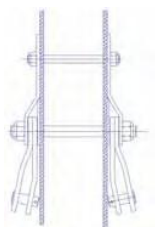


Figura 140: Unión arraigo obenques

Esfuerzos	Sin refuerzo		Con refuerzo	
	Obenques estribor (813)	Obenques babor (785)	Obenques estribor (813)	Obenques babor (785)
Fx	0.27763E+08	0.28551E+08	0.28954E+08	0.30244E+08
Fy	0.76079E+09	0.78239E+09	0.79962E+09	0.82258E+09
Fz	-0.14283E+09	0.14688E+09	-0.17214E+08	0.21527E+08
Mx	-0.11147E+07	0.10857E+07	-0.11682E+07	0.11889E+07
My	-0.20981E+07	0.22538E+07	0.41438E+07	-0.15250E+07
Mz	0.19051E+06	0.18552E+06	0.19972E+06	0.20326E+06

Tabla 67: Esfuerzos arraigos obenques altos

Conclusiones

Observando los resultados, la instalación del refuerzo reduce considerablemente los esfuerzos en el perfil, sobre todo los correspondientes al eje z que son las que podrían desgarrar el perfil.

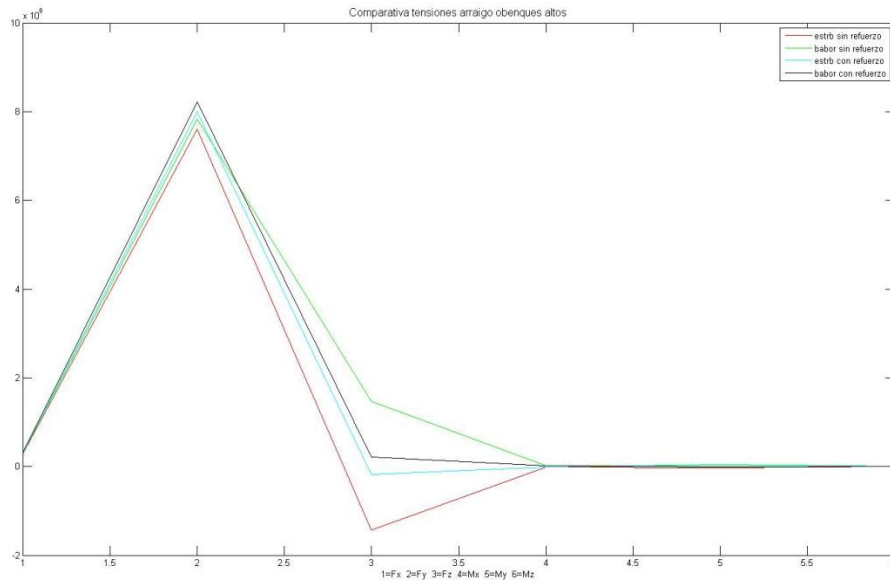


Figura 141: Comparativa obenques

8.5.Modelo 25: refuerzo crucetas

Las crucetas producen una compresión en el mástil que podríamos reducir con la colocación de algún perfil que transmitiera de unas a otras dichas cargas.



Figura 142: Unión crucetas

Esfuerzos	Sin refuerzo		Con refuerzo	
	Crucetas estribor (938)	Crucetas babor (833)	Crucetas estribor (938)	Crucetas babor (833)
Fx	-0.66250E+06	-0.76401E+06	-0.74516E+06	-0.93474E+06
Fy	0.28331E+09	0.28997E+09	0.28140E+09	0.28822E+09
Fz	0.33754E+07	-0.38876E+07	43352	-0.55700E+06
Mx	0.56391E+07	-0.55361E+07	0.50502E+07	-0.47502E+07
My	-0.15103E+06	0.49237E+06	-0.33942E+06	0.27076E+06
Mz	-0.96652E+06	-0.94889E+06	-0.86552E+06	-0.81410E+06

Tabla 68: Esfuerzos crucetas superiores

Conclusiones

El incorporar refuerzos en las crucetas no es tan beneficioso como en los obenques altos, esto es debido a una peculiaridad ya vista en la descripción del aparejo: las crucetas comprimen el perfil, pero de compensar este esfuerzo ya se encargan los obenques intermedios, de manera que podría no incorporarse por ser su utilidad reducida.

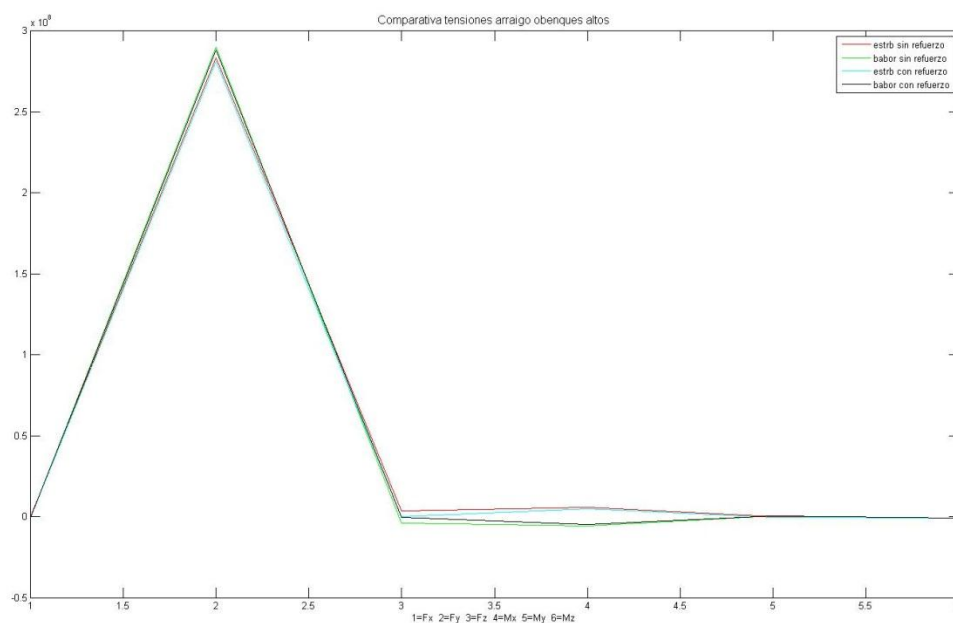


Figura 143: Comparativa esfuerzos crucetas superiores

8.6. Modelo 26: Salidas elementos botavara

De la misma manera que el mástil tiene orificios para la salida de las drizas, la botavara también lleva en su interior cabos como los rizados o el pajarín.

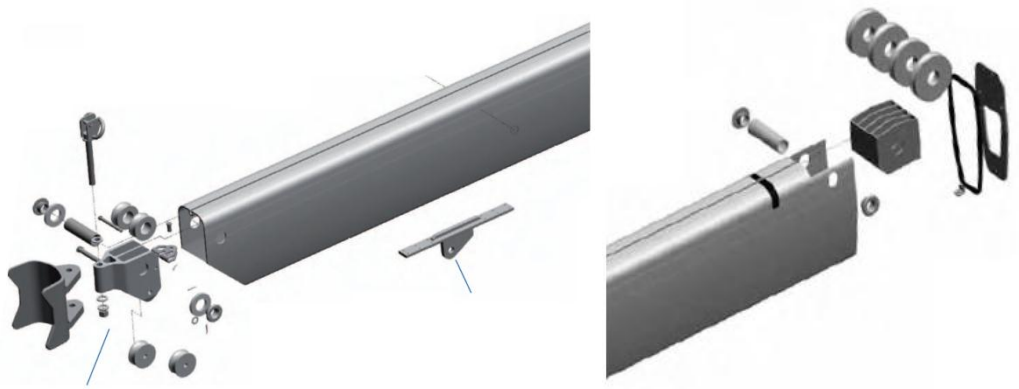


Figura 144: Botavara real

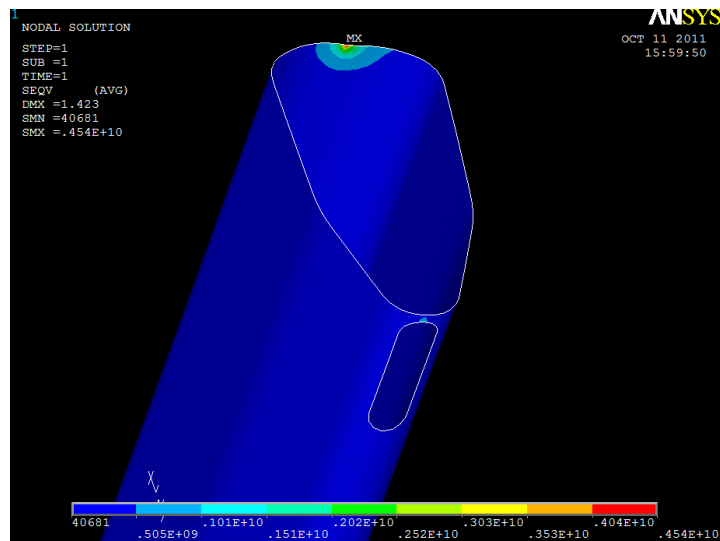


Figura 145: M26 tensiones

Viendo como las tensiones son mayores en el arraigo del puño de amura de la mayor, la salida de los cabos tiene un punto destacable de solicitaciones, pero sin llegar a ser crítico.

9. Conclusiones

Una vez desarrollados todos los modelos y, estudiado en profundidad las zonas que podrían interpretarse como críticas, se puede elegir entre todos ellos los más válidos para incorporar en los barcos y que sean capaces de desarrollar sus funciones correctamente.

Debido a las limitaciones del programa, las velas se han simplificado mucho y no son del todo fieles a la realidad al ser demasiado rígidas, pero pueden aproximarse al comportamiento en funcionamiento.

Los modelos más destacables son:

- Para cruceros el modelo 6, apoyado en la cubierta, reduciendo el costo de una fognadura y de material, así como la agilidad de maniobra al no incorporar burdas ni babystay.
- Para regatas o gente más exigente optaríamos por el modelo 12 apoyado en la quilla, el 11 si se quisiera evitar la fognadura pero no renunciar al trimado del palo o, de ser más exigentes, el modelo 13, que permite ajustar el palo con mayor precisión a las diversas situaciones con una fognadura que ayudaría a sobrecargar menos la jarcia.

Ha resultado, personalmente, sorprendente la capacidad de tensiones y esfuerzos que han presentado los diferentes modelos; así como, con pequeños ajustes, se pueden lograr unas mejoras muy notables.

Se puede optar por varios modelos diferentes que dependerán del comprador, pero tampoco es que las diferencias entre unos y otros sean muy diferentes. A destacar es que todos los modelos implementados son capaces de soportar las cargas a las que les estamos sometiendo, sin estar muy cerca de sus límites mecánicos.

No han aparecido puntos críticos ni grandes concentraciones de tensiones como cabía esperar, por tanto se puede deducir que las roturas y desarboladuras se darán en aquellas secciones que hayan sufrido desgastes excesivos o tengan problemas de montaje o de construcción.

10. Desarrollos futuros

Debido a diversas circunstancias, no hay tiempo o medios para desarrollar todos los modelos que se hubiera querido. A continuación hay una relación de los estudios que no se han podido llevar a cabo.

10.1. Modelo 27: Rotura en caso de vuelco

Es poco probable, pero en circunstancias límite puede darse el caso de que un velero se coloque quilla al sol, debido al peso de la orza, él sólo debería adrizarse pero, si desarbolase, la vuelta al adrizamiento sería más rápida y más estable posteriormente al haber perdido el velamen.

Comprobando si en caso de vuelco, la presión del agua sería capaz de superar el límite de algún elemento estructural.

$$velocidad_adrizamiento \cong 5.655 km/h; \quad \rho_{agua} = 1 g/cm^3$$

$$\text{Presión dinámica } p = \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$p = \frac{1}{2} 1 \frac{g}{cm^3} \cdot \left(5.665 \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{1000m}{1km} \right)^2 \cdot \frac{100^3 cm^3}{1m^3} \cdot \frac{1kg}{1000g}$$

$$p = 1238.1 kg \frac{m^2}{m^3 s^2} = 1238.1 \frac{N}{m^2} \cdot \frac{1m^2}{(100)^2 cm^2}$$

$$p = 0.1238 \frac{N}{cm^2} = 12.381 \frac{kg \cdot cm}{s^2 \cdot cm^2}$$



Figura 146: Rotura de mástil

Debido a los elementos con los que se simula, el elemento de las velas no puede transmitir los esfuerzos de la carga del agua a la estructura como para obtener resultados válidos, de manera que habría que estudiarlo con algún otro programa más adelante.

10.2. Modelo 28: Palo giratorio

Realizar una comparativa entre algunos de los diversos modelos de jarcia existentes y las ventajas e inconvenientes de ellas y una posible fusión de características sobresalientes. Los siguientes modelos son estructuras adoptadas en la última Barcelona World Race, donde cada equipo podía optar por distintos perfiles de jarcia.

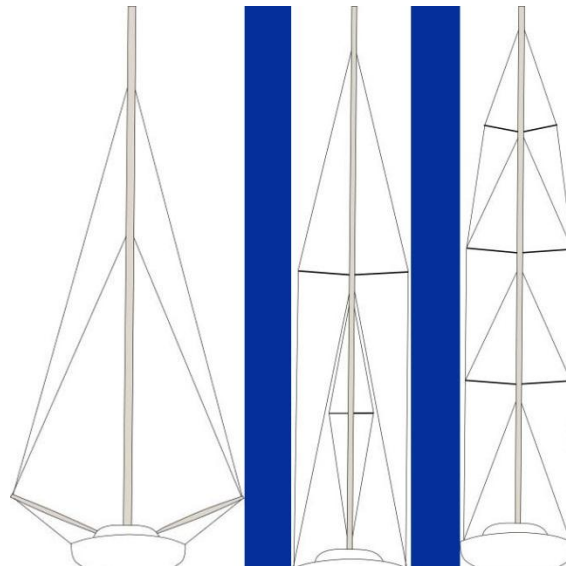


Figura 147: Diversas configuraciones de jarcia

10.3. Modelo 29: Reducción perfil

Como se vio en la descripción del aparejo, son las dimensiones del perfil lo que más peso tiene en sus propiedades mecánicas por delante de los espesores; en este apartado se hubiera tratado de jugar con diversos espesores en diferentes zonas del perfil, así como su geometría.

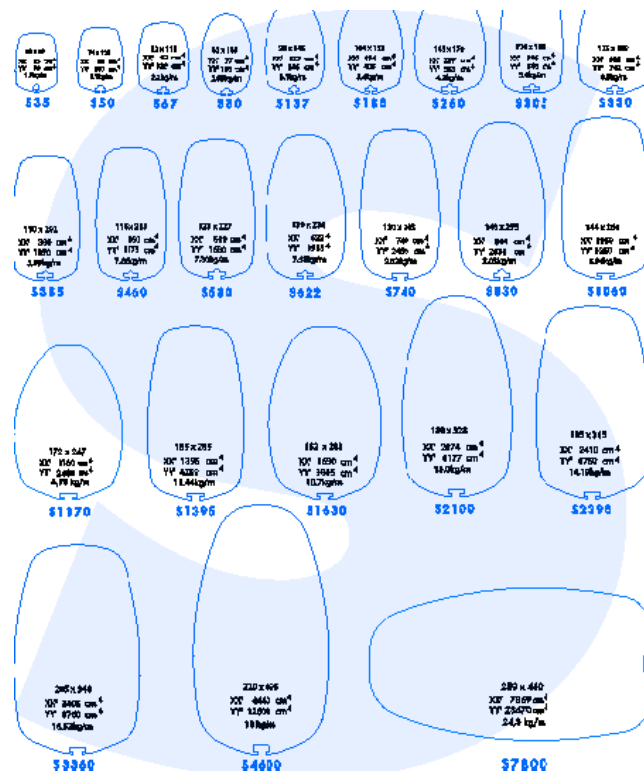


Figura 148: Diversos perfiles Sparcraft

10.4. Modelo 30: Fatiga

Un mástil está sometido constantemente a variaciones de esfuerzos: vientos racheados, pantocazos, olas, izada y arriada de velas, direcciones diferentes de rumbo, cambios en las zonas de carga por viradas o trasluchadas...

Sería muy interesante simular estas variaciones y ver la reacción de la superestructura ante ellas.

⁷ Sparcraft. Performance engineering. Catálogo

11.Anexo

11.1. Código cdg

Para obtener las coordenadas del centro de gravedad se emplea el siguiente código⁸:

```
asel,all, $ asum $ *get,a1,area,,cent,x $
```

11.2. Tensiones jarcia

Para conocer el esfuerzo axial de la jarcia se puede llegar por: General Postproc/Element Solution/Line Element Results/Element Results y allí buscar el elemento y así conocer su esfuerzo axial por el valor de SDIR.

⁸ Eng-tips. Software Suite technical support forum and mutual help system for engineering professionals

12. Glosario términos náuticos⁹

ADRIZAR

Enderezar una embarcación que iba escorada.

AFERRAR

Recoger en pequeños pliegues una vela y unirla a su verga, percha, o estay, por medio de tomadores para que no reciba el viento. Hacer lo propio con toldos, banderas, etc.

ALETA

Parte del barco comprendida entre el través y la popa. * Viento por la aleta: Se llama al que se recibe por el ángulo comprendido entre el viento de popa y el largo. * Skeg.

AMAINAR

Calmar el viento o la mar.

AMANTILLO

Cabo que sirve para mantener horizontal una percha cruzada y evitar que ésta se caiga.

AMOLLAR

Aflojar la escota u otro cabo. * Amollar en popa: Derivar hasta ponerse viento en popa.

AMURA

Puño de amura. * Banda de la embarcación por donde se recibe el viento; por extensión, en la navegación en popa es el lado contrario a donde cae la botavara. * Parte de los costados del buque donde éste empieza a estrecharse para formar la proa.

AMURADO A BABOR/ESTRIBOR

Cuando el barco navega recibiendo el viento de esa amura.

APAREJAR

Guarnecer a un velero de todos sus palos, perchas, jarcias y velamen poniéndolo en condiciones de navegar.

APAREJO

Sistema de poleas y cabos para facilitar un trabajo. * El conjunto de palos, perchas y jarcias de un velero. * Las distintas combinaciones de velas que pueden llevar los veleros; así decimos aparejo de sloop, de cúter, yawl, etc. * Aparejo al tope: Aparejo en el cual el estay proel está encapillado en el tope del mástil. * Aparejo fraccional: Aparejo en el cual el estay proel está encapillado debajo del tope del mástil, a una distancia de éste que depende del diseño del barco.

⁹ Editorial Planeta. *Enciclopedia ilustrada de la navegación a vela.*

APOPADO

Dícese del mástil cuando presenta inclinación a popa. * Dícese del barco que está muy hundido de popa.

APOPAR

Llevar pesos hacia popa. * Poner el barco de popa al viento, corriente o lugar determinado estando al ancla. * Calar demasiado de popa.

ARBOLADURA

Conjunto de palos y vergas de un buque.

ARBOLAR

Colocar en un buque los palos.

ARDIENTE

Dícese del barco muy propenso a orzar, poniéndose al viento.

ARRIZAR

Tomar mano de rizos.

BABOR

La banda o costado izquierdo del barco mirando de popa a proa.

BALUMA

Caída de popa de las velas.

BALUMERO

Artificio que se usa para tesar la baluma.

BANDAS

Son las partes que quedan a uno y otro lado del plano de crujía. * Estar en banda: Se dice del cabo o cable que está enteramente flojo. * Largar en banda: Soltar un cabo u otro objeto de golpe.

BARLOVENTEAR

Ganar distancia contra el viento navegando de bolina.

BARLOVENTO

La parte de donde viene el viento, con respecto a un punto o lugar determinado.

BORDA

Línea de unión del casco con la cubierta. * Vela mayor en las galeras.

BOTALÓN

Palo largo, herrado y aparejado, el cual se saca hacia la parte exterior del buque para varios usos.

BOTAR

Echar al agua un buque.

BOTAVARA

Percha horizontal que se articula en la parte inferior del mástil y sirve para tesar el pujamen de la vela. * Botavara principal: La del palo mayor.

BRANDAL

Cabo grueso que se da en ayuda a los obenques de juanete. * Cada uno de los dos ramales de cabo sobre los que se forman las escalas de vientos.

BRAZA

Cabo que laborea por el penol de las vergas y sirve para mantenerlas fijas y hacerlas girar en un plano horizontal. * Unidad de longitud, equivalente a seis pies o sea 1,8288 m.

BURDA

Sinónimo de brandal en los aparejos antiguos. * Cable que viene de lo alto de la arboladura y se tensa firme en cubierta y hacia popa. Puede ser fija o de labor, y en este caso lleva en el firme de cubierta un aparejo o palanca. * Burda volante: Obenque suplementario que se cambia de amura en las viradas.

CABECEAR

Moverse el buque levantando y bajando alternativamente la proa.

CABECEO

Movimiento que se da al cabecear.

CABO

Cualquiera de las cuerdas que se usan a bordo. * Punto de tierra que se interna en el mar.

CAER

Modificar el rumbo, desviándolo a una determinada banda. * Tratándose del tiempo o de la mar, calmarse. * Pasar de pronto de un punto de menor fondo a otro más profundo.

CAÍDA

Inclinación de un palo hacia popa o hacia proa. * Los lados de las velas que van de arriba hacia abajo.

CARABELA

Antigua embarcación muy ligera, larga y angosta, con sólo una cubierta y tres palos, y cofa sólo en el mayor, entenas en los tres para velas latinas y algunas vergas en cruz en el mayor y en el de proa. * Forrado a carabela: Sistema de construcción de buques de madera utilizado antiguamente.

CARENA

Obra viva. * Reparación que se hace en el casco de la nave.

CASCO

Cuerpo propiamente dicho de la embarcación.

CATAVIENTO

Hilo colocado en los obenques que cumple la misma función que la grímpola.

CAZAR

Cobrar de las escotas de las velas para orientarlas. * Atraer hacia sí un cabo cualquiera.

CENTRO DE CARENA

Punto donde se aplica la resultante de las fuerzas de flotación que actúan sobre la carena.

CENTRO VÉLICO

Punto imaginario donde se aplica la resultante de la acción del viento aparente sobre las velas.

CEÑIDA, EN

Navegar ciñendo.

CEÑIR

Navegar contra el viento en el menor ángulo posible; navegar de bolina.

CONTRA

Prefijo que significa segundo.

CONTRAAMANTILLO

Cabo que sirve para mantener horizontal una percha cruzada y evitar que ésta se levante.

CONTRAAMURA

Cabo grueso que se da en ayuda a la amura de las velas mayores en malos tiempos.

CONTRABRAZA

Braza que se da habitualmente en una botavara hacia proa cuando se navega en popa para evitar la trasluchada.

CONTRADRIZA

Segunda driza que se da en ayuda a la principal.

CONTRAESCOTA

Cabo que se da en ayuda de la escota.

CONTRAESCOTÍN

Cabo que se da en ayuda del escotín.

CONTRAESTAY

Cabo que refuerza el estay y ayuda a sostener el palo, llevándolo hacia proa.

CONTRAMAESTRE

Oficial de mar que manda las maniobras y faenas del barco, y cuida de la marinería, bajo las órdenes de los oficiales.

CONTRAMESANA

Árbol pequeño que en algunos buques está entre la popa y el palo mesana.

CRUCETA

Barras de madera o metal más o menos perpendiculares a los mástiles en el sentido de babor a estribor, que sirve para reforzarlos descomponiendo el esfuerzo de los obenques con el objeto de lograr que los palos mantengan su rigidez, evitando el pandeo.

CRUJÍA, EJE DE

Impropia mente denominado eje, es el plano que divide de proa a popa la embarcación en dos mitades simétricas (bandas de babor y estribor).

CUADERNA

Cada una de las piezas curvas cuya base encaja en la quilla del buque, y desde allí arranca a ambos lados, formando las costillas del mismo. * Cuaderna maestra: La que se coloca en el punto de manga máxima.

CUADERNAL

Conjunto de dos o tres poleas colocadas paralelamente dentro de la misma armadura.

CUADERNO DE BITÁCORA

Libro rayado y encasillado convenientemente en el cual se anotan todos los elementos que sirven para llevar la estima, las situaciones astronómicas, las observaciones meteorológicas y los acontecimientos notables de la navegación, cuyas anotaciones las hace cada oficial al rendir su guardia.

CUADRA

Anchura del buque en la cuarta parte de su eslora, contada desde proa o desde popa. * Vela cuadra: Vela de cruz. * A la cuadra: De través. * Dirección perpendicular a la quilla o al rumbo, equivalente al través.

CUBIERTA

Cada uno de los pisos de un navío situados a diferente altura. * Cubierta alta o principal: La superior, que por antonomasia se llama solamente cubierta.

CUNNINGHAM

Ollao ubicado unos centímetros por encima del puño de amura de la vela Marconi, que se usa para achatar la vela. * Por extensión, se denomina así a todo el aparejo asociado.

CÚTER

Aparejo de un solo mástil y dos estays proel. Carga trinquetilla, foque, y vela mayor.

DESAPAREJAR

Quitar el aparejo de una embarcación.

DESARBOLAR

Destruir, tronchar o derribar los palos de una embarcación. * Desarmar la arboladura.

DESARMAR

Quitar a un barco su armamento o pertrechos necesarios para la navegación.

DESCUBIERTA

Inspección del estado del aparejo de un buque. * Reconocimiento que a la salida y puesta del sol se hace de todo el espacio circundante, hasta donde alcanza la vista.

DESENCAPILLAR

Zafar o desprender lo que está encapillado.

DESENRIZAR

Desrizar.

DESPLAZAMIENTO

Peso del volumen de agua desalojado por la obra viva de la embarcación. De acuerdo al principio de Arquímedes, es igual al peso de la embarcación.

DESPUNTAR

Contornear una punta o cabo de la tierra.

DESRELINGAR

Quitar las relingas a las velas.

DESRIZAR

Soltar los rizos.

DRIZA

Nombre dado a los cabos o cables que izan las velas en los palos. *
Puño de driza: Puño alto de las velas triangulares.

EMPOPADA

Popa redonda.

EMPOPAR

Virar hasta colocar la popa al viento.

ENJARCIAR

Poner la jarcia a una embarcación.

ENVERGAR

Sujetar las relingas de las velas a las vergas. Por extensión, se aplica a la acción de afirmar una vela a un palo o estay.

ESCORA

Angulo formado por el plano de crujía con respecto a un plano vertical.

ESCORAR

Inclinar el velero hacia una banda.

ESCOTA

Cabo o aparejo afirmado en los puños de escota de las velas o en la botavara. Sirve para bracear a aquellas. * Puño de escota: Puño bajo de popa de la vela.

ESCOTERA

Abertura o artificio por donde pasa una escota.

ESTAY

Cable de acero que sujeta los palos en el sentido longitudinal. * Estay de violín: Estay que está tomado por sus dos extremos en el mástil, y que tiene una martingala en el medio. Se utiliza para ayudar a soportar los esfuerzos de flexión en el mástil. * Estay de galope: El más alto de todos, que sujeta el tope de los mastelerillos. * Babystay: Estay que, en los aparejos al tope, se utiliza para dar una cierta curvatura al mástil.

ESTRIBOR

Costado derecho, mirando de popa a proa

FOQUE

Vela triangular que va envergada en los estays de proa. Cuando hay varias, indica la ubicada más a proa.

FORTUNA, DE

Dícese de todo aquello que se arma con los recursos de a bordo cuando por avería no se pueden utilizar los elementos normales.

FRAGATA

Embarcación de tres palos (trinquete, mayor y mesana) y aparejo de vela cuadra.

GARRUCHO

Anillo o patín que corre por el esnón de una percha o por un estay, y que va firme en la relinga de una vela.

GÉNOVA

Vela foque, con el puño de escota más bajo, pujamen más largo y mayor superficie. De acuerdo a ésta se designan a los distintos tipos génova uno, génova dos y génova tres, siendo la uno la mayor.

GOLETA

Embarcación y aparejo de dos palos aproximadamente iguales, que generalmente cargan velas cangrejas. También hay goletas de tres palos de iguales características.

GRATIL

Lado de la vela que se sujeta al palo o estay. * Gratil alto: En la vela tarquina y la cangreja, la orilla que se ubica entre los puños altos.

GUIÑADA

Movimiento de un buque que cae sucesivamente de una banda a la otra, ya sea por marejada, mal gobierno, etc.

IZAR

Hacer subir un objeto, tirando de un cabo.

JARCIA

Aparejos y cabos de una embarcación. * Jarcias fijas: Conjunto de cables y cabos que, tesados, sirven de sostén y refuerzo a palos, perchas, etc. * Jarcias móviles: Conjunto de cables y cabos que sirven para maniobrar las vergas, velas, etc. * Jarcias de labor: Jarcias móviles.

JARCIAR

Enjarciar.

LATINA

Vela triangular envergada en entena, que suelen usar las embarcaciones de poco porte.

LATINO

Aparejo que lleva velas latinas.

MÁSTIL

Palo de una embarcación.

O BENQUE

Cada uno de los cables que sujetan los palos por los costados. Se tesan y templan con tensores, que van tomados de las landas. Cuando hay dos pares, se denominan obenques altos y bajos. * Obenque intermedio: El que va de un extremo de la cruceta baja al arraigo de la alta.

O BENQUILLOS

Obenque encapillado a mitad del tramo entre la encapilladura de los obenques altos y la cruceta, que van hasta el extremo de la misma.

OBRA MUERTA

La parte del casco que va de la borda a la línea de flotación.

OBRA VIVA

La parte del casco que va sumergida.

OREJA DE BURRO

Navegación en popa, con las velas braceadas una para cada banda

ORZA

Pieza suplementaria de madera o metal con movimiento de ascenso y descenso que se coloca en las embarcaciones para aumentar la resistencia lateral y disminuir el abatimiento. Tipos: sable, rebatible. * Acción y efecto de orzar. * Orza a popa: Cabo con que se lleva a popa el car de la entena. * Orza de avante: Orza a popa del trinquete.

ORZAR

Caer la proa a la banda de barlovento. Por extensión, en la navegación en popa es caer a la banda de la amura.

PALO

Cada uno de los elementos de la arboladura que va más o menos perpendicularmente a la quilla y destinado a sostener las vergas. * Palo seco: Dícese del buque que tiene todas sus velas apagadas. * Palo trinquete: El que se arbola inmediato a proa, delante del mayor. * Palo mayor: Palo más alto del buque y que sostiene la vela principal. * Palo mesana: Palo que se arbola a popa del mayor. * Palo macho: El que va desde la sobrequilla hasta el primer mastelero.

PANDEO

Curvatura lateral de un palo.

PANTOCAZO

Golpe dado por el buque en el agua con el pantoque al cabecear.

PANTOQUE

Parte casi plana del casco, que forma el fondo junto a la quilla.

PAÑO

Las velas que lleva una embarcación. * La tela con que están hechas las velas.

PAÑOL

Cualquiera de los compartimentos que se hacen en diversos lugares del buque, para estibar objetos. Toman cada uno la denominación de acuerdo a su contenido.

PATÍN

Garrucho. * Herraje que corre sobre un riel firme en cubierta que sirve de sostén móvil a un motón, generalmente motones escoterados.

PENOL

Extremo de una verga o percha. Puede ser proel o popel, o de estribor o babor.

PERCHA

Tronco enterizo de árbol, descortezado o no, que por su especial tamaño sirve para la construcción de piezas de arboladura, botalones, vergas, etc.

PERILLA

Remate del tope de un mástil o de un asta bandera.

POPA

Parte posterior de una embarcación. * En popa redonda: Dícese del velero que navega recibiendo el viento por la popa.

POPEL

Dícese de un objeto situado más a popa que otro con el que se compara.

PORTAR

Dícese de las velas cuando toman el viento correctamente.

PROA

Parte anterior de una embarcación.

PROEL

Parte relativamente más cercana a proa que el objeto con el que se compara. * Marinero que se ocupa de las labores propias de la proa.

PUÑO

Cada uno de los ángulos de una vela. * El extremo más delgado del guión del remo.

QUILLA

Pieza que va de proa a popa por la parte inferior del barco, donde asienta toda su armazón. * Quilla de balance: Cada una de las piezas longitudinales y salientes de la obra viva paralelas a la quilla, que sirven para amortiguar los balances. * Quilla limpia: Dícese de la medida de longitud de un buque, contada solamente por su quilla. * Falsa quilla: Refuerzo exterior de la quilla, donde va fijado el quillote.

REGATA

Carrera de embarcaciones.

SABLE

Listón plano que se introduce en las vainas que algunas velas tienen en su caída de popa, para mejorar las condiciones de escape de la vena fluida, y ayudar a mantener el alunamiento.

SLOOP

Aparejo formado por un solo palo, con vela de proa y mayor.

SOTAVENTO

Lado contrario a donde viene el viento. Antónimo de Barlovento.

SPINNAKER

Vela triangular que se establece con un tangón y se usa con vientos francos. Es de gran superficie y alto poder de empuje.

STOPPER

Variante de mordaza de nueces, donde una nuez es movable por la palanca que sale hacia arriba, trabando o destrabando.

SUPERESTRUCTURA

Todo lo que se construye sobre la cubierta principal.

TANGÓN

Percha que se utiliza para establecer un spinnaker o una vela de proa en orejas de burro.

TEMPLAR

Equilibrar proporcionalmente la tensión de la jarcia fija.

TENSOR

Herraje regulable que permite templar la jarcia fija.

TRAVÉS

Dirección perpendicular al eje de crujía de la embarcación. * De través: Dícese del velero que navega recibiendo el viento por el través.

TUMBAR

Dar vuelta la embarcación, hecho que acontece al quedar el metacentro por debajo del centro de gravedad.

VELA

Superficie formada por la unión de varios paños por medio de costuras y que izada en los mástiles aprovecha la fuerza del viento para impulsar la embarcación.

VELACHO

Gavia del trinquete.

VELAJE

Velamen.

VELAMEN

Conjunto de velas de una embarcación.

VIENTO

Corriente de aire producida en la atmósfera por causas naturales. * Cables de acero que sujetan el botalón por ambos costados. * Al viento: Posición del barco en la cual la proa apunta directamente contra el viento. * Viento real: El medido tomando como sistema de referencia la tierra. * Viento aparente: El medido a bordo del buque, tomándolo como referencia. Difiere del real en que éste es igual al aparente más la velocidad del buque (suma vectorial).

VUELTA DE CAMPANA

Tumbada que da la embarcación quedando los palos hacia el fondo.

ZAFAR

Rebasar, desembarazarse, separarse de un estorbo, estar libre o escapar de algún peligro.

13. Bibliografía

- Sáez Pérez, Andrés y Ariza Moreno, Pilar. *Método de los elementos finitos. Introducción a Ansys*. Universidad de Sevilla. Secretariado de publicaciones, 1999.
- Barros, Sergio. *Historia de la navegación*. Preparado por Patricio Barros. Sucesos, Grandes reportajes a la historia del mundo, número 20. Disponible en web: <<http://www.librosmaravillosos.com/historiadelanavegacion/index.html>>
- Beer, Johnston, Clausen. *Mecánica vectorial para ingenieros*. Séptima edición. Mc Graw Hill. 2004
- Díaz y Díaz, José y Muñoz León, Luis G. *Enciclopedia Buques de Guerra* 1999
- Oñate Ibáñez de Navarra, Eugenio. *Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos: análisis elástico lineal*. 1995
- del Coz Díaz, Juan José / Surez Domínguez, Fco. José. *Introducción al programa Ansys*. E.T.S. Ingenieros Industriales-Gijón. <<http://www.construccion.uniovi.es/>>
- Editorial Planeta. *Enciclopedia ilustrada de la navegación a vela*.
- *Geometría del palo, tensión bajo control*. Revista YATE. Julio 1996, número 358
- Brunori Albergotti, Roberto. *Historia de los principales barcos desde la Edad Media hasta el galeón*. Universitat Jaume I. Castellón, 2005.
- Les Glenans. *Diccionario de la navegación de recreo*.
- Roa Garzón, Máximo Alejandro y Garzón Alvarado, Diego Alexander. *Tutorial Ansys*. Universidad Nacional de Colombia
- Linero Segrera, Dorian Luis. *Elasticidad plana mediante el MEF, empleando Ansys*. Universidad Nacional de Colombia
- Martínez Hidalgo, José M. *Diccionario náutico*. Nauta
- Glosario términos navales. Disponible en web: < <http://www.alquiler-directo.com/alquiler-barcos/diccionario-nauticoC.htm>>
- *Certificados/Rating nacional*. Real federación española de vela, Madrid. Real asociación nacional de cruceros, Barcelona. Disponible en la web: < <http://certificados.ratingnacional.es/>>

- Selden mast. Catálogo < <http://www.seldenmast.com/firstpage.cfm>>
- Sparcraft. Performance engineering. Catálogo
< <http://www.sparcraft.com/uk/products/overview/default.asp>>
- Rebolo Gómez, Rafael. *La armada Cartaginesa*.<
http://www.grijalvo.com/Rebolo_Gomez_Rafael/Armada_Cartaginesa/0_Indice.htm>
- Yates. *Barcos de vela*. Junio 2009. Disponible web:
<<http://www.microcaos.net/historia/barcos-de-vela/>>